

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA TEXTILNÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

LIBEREC 2012

MILENA MARYŠKOVÁ

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA TEXTILNÍ



Studijní program: B3107 Textil

Studijní obor: 3106R004 Netkané textilie a nanovlákná

**STUDIUM TEPELNÉ A ELEKTRICKÉ
VODIVOSTI GEOPOLYMERŮ**

**STUDY OF THERMAL AND ELECTRICAL
CONDUCTIVITY OF GEOPOLYMERS**

Milena Maryšková

Vedoucí bakalářské práce: Doc. Ing. Lenka Martinová, CSc.

Rozsah práce

Počet stran textu: 58

Počet obrázků: 22

Počet tabulek: 4

Počet grafů: 27

Počet stran příloh: 7

Zadání bakalářské práce

1. Vypracujte rešerši týkající se vlivu složení geopolymérů na jejich tepelnou a elektrickou vodivost.
2. Připravte sérii geopolymerních vzorků s modifikovaným složením a různými typy aditiv.
3. Zhodnoťte změnu sledovaných vlastností vhodně zvolenými testy na připravených vzorcích.
4. Výsledky shrňte a diskutujte.

Prohlášení

Byla jsem seznámena s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Poděkování

Děkuji zejména vedoucí mé bakalářské práce Doc. Ing. Lence Martinové, CSc. za cenné rady a pomoc při řešení problémů, se kterými jsem se musela při svém bádání potýkat.

Mé poděkování patří také Mgr. Štěpánce Kvapilové, která mě zasvětila do problematiky práce s geopolymery a vždy se se mnou dělila o své poznatky.

Děkuji také Ing. Jaroslavu Noskovi za jeho odbornou pomoc a inovování technologií určených pro měření.

V neposlední řadě pak děkuji Jakubu Noskovi za čas strávený měřením elektrické vodivosti.

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá studiem elektrické a tepelné vodivosti geopolymerů s obsahem vodivé komponenty. Cílem je nalézt vhodné aditivum a optimálně definovat poměr všech obsažených složek geopolymery s cílem maximálně dosažitelné tepelné a elektrické vodivosti. Teoretická část popisuje problematiku chemického složení, struktury a vlastností geopolymerů včetně používaných materiálů. Obsahuje také kapitoly zabývající se elektrickou a tepelnou vodivostí. Experimentální část shrnuje postup práce při přípravě vzorků s požadovanými vlastnostmi, naměřené hodnoty a porovnání použitých metod přípravy geopolymerů.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Geopolymer, metakaolin, baucis L160, elektrická vodivost, tepelná vodivost, měď, bronz, hliník, nano-magnetit, grafit

Anotation

This thesis reports on study of the electrical and thermal conductivity of geopolymers with some conductive content. The aim is to find suitable additive and optimally define the ratio of all included components to gain maximum possible thermal and electrical conductivity. The theoretical part describes area of chemistry, structure and properties of geopolymers including used materials. This part also contains chapters on the electrical and thermal conductivity. The experimental part gathers the work progress in making samples with required properties, measured values and comparison of applied manufacturing methods.

KEY WORDS:

Geopolymer, metakaolin, Baucis L160, electrical conductivity, thermal conductivity, copper, bronze, aluminum, nano-magnetite, graphite

Seznam zkratek a symbolů

Zkratky

akt.	aktivátor
el.	elektrický
hm	hmotnost/ní
např.	například
obr.	obrázek
Kč	koruna česká
atd.	a tak dále
tzv.	tak zvaný
HEMA	hydroxyethyl metakrylát
PE	polyetylen
PTFE	polytetrafluoretylen
ČLUZ	České lupkové závody a.s.

Symboly

$Q [J]$	teplo
$\lambda [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	součinitel tepelné vodivosti
$G [S]$	elektrická vodivost
$\rho [\Omega \cdot m]$	měrný odpor

Obsah

Úvod.....	9
1 Teoretická část.....	10
1.1 Struktury geopolymérů.....	10
1.2 Geopolymerace	11
1.2.1 Elektronová distribuce při geopolymeraci	12
1.2.1.1 Iontový model distribuce:	12
1.2.1.2 Kovalentní model distribuce:	12
1.3 Vlastnosti.....	13
1.3.1 Porozita	14
1.3.2 Elektrická vodivost geopolyméru	14
1.3.3 Tepelná vodivost geopolyméru.....	15
1.4 Oblasti použití geopolymérů	15
1.5 Materiály pro přípravu geopolymérů	16
1.5.1 Lupek	16
1.5.2 Metakaolin	17
1.5.3 Popílký a strusky.....	17
1.5.4 Aktivátor	18
1.6 Geopolymery Baucis.....	18
1.7 Elektrická a tepelná vodivost	19
1.7.1 Měření elektrické vodivosti	19
1.7.2 Měření tepelné vodivosti	20
1.8 Některá elektricky a tepelně vodivá aditiva	21
2 Experimentální část	22
2.1 Použité materiály.....	22
Plnivo a aktivátor	22
Vodivá aditiva.....	22
2.2 Příprava vzorků a míchání	23
2.3 Proces sušení	26
2.4 Měření tepelné vodivosti vzorků.....	31
2.4.1 Princip měření tepelné vodivosti	31

2.4.2	Výsledky měření tepelné vodivosti.....	33
2.5	Měření elektrické vodivosti.....	39
2.5.1	Princip měření elektrické vodivosti	39
2.5.2	Výsledky měření elektrické vodivosti	40
2.6	Ekonomické aspekty výroby geopolymérů s obsahem vodivých komponent .	47
Závěr.....		48
Použitá literatura		51
Seznam obrázků		55
Seznam grafů.....		56
Seznam tabulek.....		58
Seznam příloh		58
Přílohy.....		59

ÚVOD

21. století se vyznačuje hledáním nových dlouhodobě udržitelných zdrojů elektrické energie. Právě geopolymery nabízejí aplikaci podzemních akumulátorů, které by mohly sloužit jako rezervoár energie bez jakéhokoli dopadu na životní prostředí. V mé práci se snažím najít tepelně a elektricky vodivý materiál vhodný pro vyplnění puklin v hornině.

Název geopolymer vznikl spojením slov geosyntéza a polymer. Geosyntéza označuje způsob přípravy materiálu, zatímco polymer je přirovnání výsledného produktu. Geopolymery patří do třídy anorganických polymerů vzniklých reakcí (tzv. geopolymeračí) alkalických roztoků s hlinitokřemičitanovými minerály za normální teploty a tlaku. Po vytvrzení získává materiál amorfni 3D strukturu podobnou hlinitokřemičitanovému sklu, ale na rozdíl od něj se geopolymery formují za nízkých teplot. Výhodou je, že je možné během formovacího procesu připojit do struktury výztužný systém či další příměsi [1], [2].

Současné výzkumy ukazují, že technologie geopolymers byla nejspíš známa již ve Starověkém Egyptě. Joseph Davidovits zkoumal složení materiálu, ze kterého jsou postaveny pyramidy, a dospěl k závěru, že by se skutečně mohlo jednat o geopolymery. Podobné spekulace uvažují také o Starověkém Římě, říši Inků z pohoří And a Starověké Mezopotámii, vyspělé kultuře na území dnešního Iráku.

Ke znovuobjevení geopolymers došlo až v roce 1939, kdy se do cementu začaly přidávat příměsi, které zlepšovaly mechanické vlastnosti betonu. Těmito materiály byly např. vysokopecní struska, popílky a později také jílové materiály. Název geopolymer byl patentován v roce 1979 Josephem Davidovitem. V současné době se výzkum zaměřuje na použití geopolymers pro imobilizaci toxických odpadů, výrobu vynikajících izolací a stavebních materiálů, či tepelných štítů pro raketoplány [3].

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Struktury geopolymérů

Geopolymery vznikají propojením jednotlivých molekulárních celků kovalentními vazbami. Mohou obsahovat tyto molekulární celky:

siloxan	-Si-O-Si-O-
sialát	-Si-O-Al-O-
sialát-siloxan	-Si-O-Al-O-Si-O-
sialát-disiloxan	-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-
fosfát	-P-O-P-O-
fosfo-siloxan	-P-O-Si-O-P-O-
fosfo-sialát	-P-O-Si-O-Al-O-P-O-
organosiloxan	-(R)-Si-O-Si-O-(R)-

Základní stavební jednotkou je tzv. sialát (silicon-oxo-aluminate), který obsahuje molekuly SiO_4 a AlO_4 .

Poměr mezi jednotlivými celky určuje výsledné vlastnosti a strukturu geopolymery.

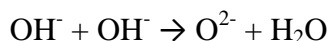
- 1) $\text{Si}:\text{Al} = 1:0$, geopolymery na bázi vodního skla $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ (Na_2SiO_3) = zakalená viskózní kapalina alkalického charakteru; polysiloxany; rozpustné křemičitany,
- 2) $\text{Si}:\text{Al} = 1:1$, geopolymery na bázi kaolinitu = minerál, který patří mezi jílové minerály, chemický vzorec $\text{Al}_4(\text{OH})_8\text{Si}_4\text{O}_{10}$; hydrogenkřemičitanu; polykřemičitany,
- 3) $\text{Si}:\text{Al} = 2:1$, geopolymery na bázi metakaolinu MK-750 = vzniká vypálením kaolinu; poly(křemičitano-siloxany),
- 4) $\text{Si}:\text{Al} = 1, 2, 3$, geopolymery na bázi vápníku; (Ca, K, Na)-křemičitany,
- 5) $1 < \text{Si}:\text{Al} < 5$, kamenité geopolymery; poly(křemičitano-multisiloxany),
- 6) $\text{Si}:\text{Al} > 5$, geopolymery na bázi křemíku; křemičitanová vazba a siloxanová vazba v polysiloxanu,
- 7) Geopolymery na bázi úletového popílku,
- 8) Fosfátové geopolymery,
- 9) Geopolymery z organických minerálů [2], [4].

1.2 Geopolymerace

Geopolymerizace je exotermní reakce, při níž vznikají sialátové strukturní jednotky (Si-O-Al), jejichž spojováním dochází k tvorbě 3D polymerní struktury. Reakce se skládá ze tří základních kroků.

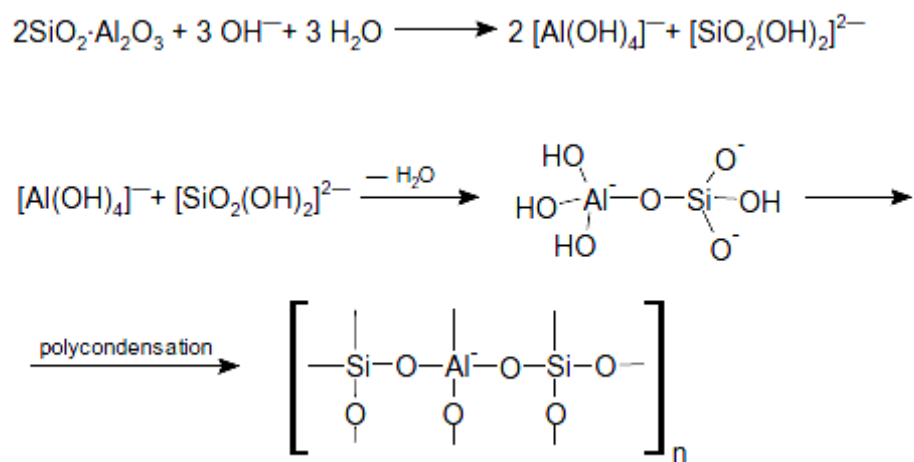
Během počátečního směšování alkalického roztoku se oddělují křemičité a hlinité ionty z amorfni fáze výchozí látky (např. lupku).

Nejprve se vytvoří koloidní roztok s částicemi křemičitých a hlinitých hydroxidů, které následně zkondenzují. Spojením hydroxidových aniontů vznikají oxidové anionty a molekuly vody.



Následné monomery v roztoku vypadají takto; **Si-O-Al-O** (sialát) a nebo **Si-O-Al-O-Si-O** (sialát-siloxan) [5],[6].

Geopolymerizační reakce je popsána v následujících rovnicích v obrázku 1.

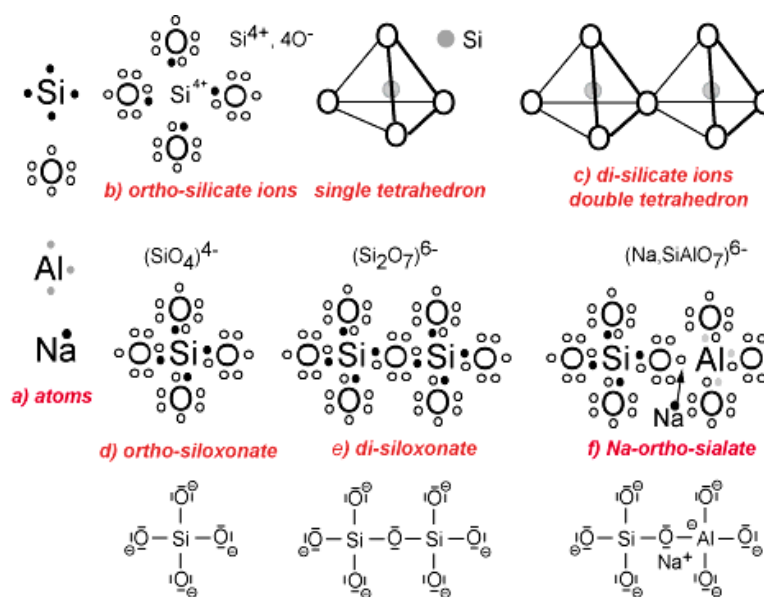


Obrázek 1 Geopolymerizační reakce [7]

Působením zvýšené teploty (obvykle 90 °C) monomery a zbylé křemičité a hlinité hydroxidy polykondenzují a polymerizují za tvorby tuhých řetězců nebo sítí tetraedrů spojených atomem kyslíku.

Další tepelné zpracování poskytuje silnější struktury. Čím více je hydroxidových aniontů, které se spojují v oxidové anionty, tím více vzniká tetraedrů, jejichž následným spojováním dochází ke komplexnějšímu zesílení [5],[6].

1.2.1 Elektronová distribuce při geopolymeraci



Obrázek 2 Elektronová distribuce při geopolymeraci

a) Maximální počet valenčních elektronů je vždy osm (tzv. elektronový oktet). Zatímco křemík má čtyři valenční elektrony (může být donorem i akceptorem), kyslík má elektronů šest, a je proto akceptorem. Hliník se třemi elektrony je donorem v kyselém prostředí, ale akceptorem v zásaditém. Sodík, který má jen jeden elektron, může být pouze donorem.

1.2.1.1 Iontový model distribuce:

b) Čtyři anionty kyslíku O^- se nejprve naváží na křemičitý kationt. Křemík je donorem, kyslík akceptorem. Tím pádem vzniká mezi ionty koordinačně-kovalentní vazba. K dosažení elektronového oktetu (stabilizaci molekuly) je nutná účast dalšího donoru, tím bývá nejčastěji kationt alkalických kovů (Na, K, Ca, Mg).

c) Spojením dvou totožných tetraedrů za sdílení oxidového aniontu O^{2-} , vzniká polyanionická struktura.

1.2.1.2 Kovalentní model distribuce:

d) Sdílením elektronů mezi atomem Si a čtyřmi atomy O, vzniká tzv. ortho-křemičitá struktura $(\text{SiO}_4)^{4-}$ s kovalentními vazbami Si-O. Atomy kyslíku mají záporný parciální náboj, který umožňuje vazbu s kladně nabitými kationty alkalických kovů.

e) Pokud dojde ke sdílení elektronů jednotlivými tetraedry, vznikají disiloxany nebo vyšší polymerické siloxany. Tato reakce se nazývá polykondenzace.

f) Ortho-křemičitá molekula s kovovým iontem (Na) vytváří v alkalickém prostředí vazbu s atomem Al (akceptorem). Vzniká kovalentní vazba Si-O-Al. Atom hliníku získává jeden elektron od příslušného kovu, čímž dostává stejný náboj jako Si, ale s opačnou polaritou.

Rozdíl mezi iontovými (koordináčními) a kovalentními vazbami mezi makromolekulami je značný. Dvojitý tetraedr ve struktuře c) sdílí jeden oxidový aniont O^{2-} , zatímco v disiloxanové molekule na obrázku e) je kovalentní vazby mezi Si-O dosaženo sdílením pouze jednoho elektronu. Struktura e) je tedy pevnější [8].

1.3 Vlastnosti

Amorfnní struktura geopolymernů vykazuje zajímavé vlastnosti a výhody:

- ve vodě nejsou rozpustné,
- nehoří a nevytvářejí zplodiny,
- odolnost vůči teplotám okolo 1000 °C,
- mrazuvzdorné,
- tepelná vodivost se liší podle druhu a množství plniva (polymer sám má velmi nízkou teplotní vodivost),
- pevnost v tlaku podle množství a druhu plniva je asi 100 MPa (geopolymer dosáhne maximální pevnosti v průběhu desítek hodin či dnů),
- ekologický způsob výroby [9].

Uvedené vlastnosti lze ovlivňovat podílem příměsí. Významným činitelem je poměr Si:Al. Geopolymerní materiál, jehož základem je dehydroxilovaný kaolin s vysokým obsahem Si:Al, při zahřívání uvolňuje bubliny, což má za následek tvorbu pěny. Tyto vlastnosti jsou vhodné pro použití v oblasti izolačních materiálů [10]. Poměr Si:Al má také vliv na výslednou pevnost, která se snižuje s klesajícím poměrem [11].

Dalším důležitým faktorem, který má vliv na výsledné vlastnosti geopolymernu, je teplota a doba zrání. Materiál, který je vytvrzován za vyšší teploty, vykazuje vyšší nespojitost a porozitu. Naopak v případě materiálu vytvrzovaného za nižší teploty (např. 10 °C) a mnohem delší dobu (v řádech dnů) probíhají geopolymernizační reakce pomaleji, ale ve větší míře. Důsledkem je větší pevnost [7].

1.3.1 Porozita

Porozita má vliv na řadu dalších vlastností geopolymérů, jako je pevnost, elektrická a tepelná vodivost nebo sorpce vody. Rozlišujeme několik druhů pórů, které se liší velikostí, tvarem a původem. Velké uzavřené kulaté póry vznikají průnikem vzduchu do geopolymerní pasty během míchání pevné složky s aktivátorem. Naopak vznik malých pórů nepravidelných tvarů je zapříčiněn odpařováním molekul vody.

Porozitu lze také ovlivnit poměrem jednotlivých složek nebo vhodnými přísadami. Množství pórů se zvyšuje s rostoucím poměrem $\text{H}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$. Stejně tak se s tímto poměrem zvyšuje jejich velikost. Přidáním hliníkového prášku lze také zvýšit porozitu, avšak na úkor pevnosti výsledného materiálu. Oxid křemičitý má na geopolymery opačný vliv. SiO_2 pravděpodobně brání geopolymizačním reakcím, zvláště pak rozpouštění NaOH ve vodním skle. Důsledkem je, že nezreagované části vytvářejí porézní mikrostrukturu [12], [13], [14], [15].

1.3.2 Elektrická vodivost geopolymery

Xue-Min Cui et al (2008) zkoumal elektrickou vodivost geopolymérů s chemickým složením $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--}2\text{SiO}_2$. Tato práce studuje vliv měnícího se poměru $\text{H}_2\text{O}:\text{Na}_2\text{O}$ při pevně daném poměru $\text{H}_2\text{O}:\text{Al}_2\text{O}_3=0,288$. Se zvyšujícím se poměrem $\text{H}_2\text{O}:\text{Na}_2\text{O}$ vodivost klesala, takže vysoký obsah vody má na elektrickou vodivost špatný vliv. Po vysušení vzorků při teplotě $100\text{ }^\circ\text{C}$ však vodivost rapidně vzrostla. Ve vzorcích vznikla mikroporézní struktura způsobená odpařením molekul vody.

Dále autoři studují vliv měnícího se poměru $\text{Na}_2\text{O}:\text{Al}_2\text{O}_3$. Se zvyšujícím se poměrem viskozita geopolymerní pasty rostla, a proto bylo nutné přidávat větší množství vody pro zachování ideální viskozity. Elektrická vodivost se zvyšujícím se poměrem rostla opět až po vysušení vzorků, kdy došlo k částečnému zaplnění pórů vzdušnou vlhkostí.

Obsah vody v geopolymerní pastě má tedy nepřímý vliv na nárůst elektrické vodivosti v důsledku tvorby mikroporézní struktury po vysušení na $100\text{ }^\circ\text{C}$. Geopolymerní struktura obsahuje alkalické kationty (zpravidla Na^+), které udržují neutralitu systému. Sodné kationty se volně pohybují uvnitř póru i na jeho rozhraní. Následkem tohoto jevu může elektrická vodivost dosahovat hodnot 10^{-6} S . Tyto geopolymery mohou být použity jako rychlé iontové vodiče [16].

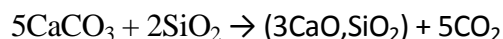
1.3.3 Tepelná vodivost geopolymery

Peter Duxton et al (2006) se zabýval tepelnou vodivostí metakaolinových geopolymery. Vzorky obsahující kationty sodíku vykazovaly až dvojnásobnou vodivost oproti vzorkům s draselnými kationty. Spíše se však jedná o tepelnou difuzi.

Největší vliv má mikrostruktura, která je dána především poměrem Si:Al. Se zvyšujícím se poměrem vzniká poměrně homogenní struktura s velmi malými póry o velikostech v řádu nanometrů. Vysoký poměr Si:Al také usnadňuje pronikání vzdušné vlhkosti do pórů po vysušení geopolymery při teplotě od 40 do 100 °C. Právě spojení homogenní mikrostruktury a určitého procenta vzdušné vlhkosti umožňuje přenos tepelné energie hmotou geopolymery [17].

1.4 Oblasti použití geopolymery

Geopolymery mají oproti běžně používanému betonu větší pevnost v tlaku a odolnost proti vysokým i nízkým teplotám a chemikáliím. Největší výhodou je však mnohem ekologičtější způsob výroby. Při výrobě 1 tuny běžného cementu uniká stejné množství CO₂, tedy opět jedna tuna. Tuto závislost ukazuje následující reakce:



Takovéto množství plynu samozřejmě značně přispívá ke vzniku skleníkového jevu a ozónové díry v atmosféře. Při výrobě geopolymery se uvolní jen šestina emisí uvolněných při výrobě cementu. Pokud bude poptávka po běžném betonu stoupat nynějším tempem, v roce 2015 bude zemská atmosféra obsahovat 3500 tun emisí vyprodukovaných pouze betonářskými společnostmi. Plné nahrazení geopolymery by znamenalo 80% až 90% snížení těchto emisí.

Výroba běžného betonu je také velice energeticky náročná. Spotřeba energie na produkci cementu je téměř 5% celosvětové spotřeby průmyslově využívané energie [9], [18], [19].

Další výhodou geopolymery je, že se do jejich struktury dají poměrně snadno zakomponovat další příměsi či výztužné materiály. Teoreticky lze vytvořit téměř dokonalou napodobeninu takřka všech známých typů kamene. Geopolymery nacházejí uplatnění v různých oblastech průmyslu (stavebnictví, konstrukční materiály, ohnivzdorné materiály a ochrana životního prostředí). Díky své výborné ohnivzdornosti jsou součástí interiérů letadel, štítů raketoplánů nebo karoserií vozů Formule 1.

Další možností uplatnění je oblast restaurátství, kamenosochařství i zdravotnického průmyslu, konkrétně výroby kostních náhrad.

Samotný geopolymery:

- imobilizace toxických nebo radioaktivních odpadů [20].

Geopolymer s příměsí (např. TiO_2 pro tvorbu fotokatalytických vrstev, PTFE pro snížení povrchového opotřebení geopolymery):

- výroba speciálních betonů
- výroba forem pro tvorbu termoplastů [21], [33].

Vyztužený geopolymery (např. uhlíková nebo skleněná vlákna zvyšují pevnost materiálu až o 30 %):

- výroba forem pro tvorbu obráběcích strojů, hliníkových slitin, ... [9], [23], [24].

1.5 Materiály pro přípravu geopolymery

1.5.1 Lupek

Lupek je sedimentační hornina, která vznikla usazením vrstev jílovce na dně prehistorických moří. Jeho podstatnou část tvoří kaolinit (jílový materiál). Lupek jako hornina tvoří snadno oddělitelné vrstvy a lupeny. Jednotlivé druhy lupku se využívají v keramickém průmyslu, např. k výrobě ohnivzdorných či žáruvzdorných produktů.



Obrázek 3 Rotační pec v ČLUZ

Z 95 % je tvořen kaolinitem. Kromě kaolinitu obsahuje SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O a Na_2O . Procentuální zastoupení jednotlivých složek se liší podle druhu lupku.

Lupek se nejprve vytěží a poté vypaluje v rotační peci při teplotě 1250–1350 °C. Tímto procesem získá specifické žáromechanické vlastnosti, zejména pevnost, tvrdost, nízkou a rovnoměrnou nasákavost.

Významná naleziště jsou v Austrálii a v České republice (České lupkové závody v Novém Strašeci). Jednotlivé druhy lupku se liší barvou, původem a zrnitostí. Existují např. lupky uhelné se zbytkem rostlin, lupky hořlavé s bohatým bitumenem (směs silně viskózních organických kapalin, černá, lepkavá), lupky písčité a lupky břidličnaté. Zbarvení po vyžhání se mění na bělavé, žlutavé, místy až narůžovělé podle obsahu Fe_2O_3 . Přítomností organických látek získává tmavé zbarvení [25], [26], [27], [28].

1.5.2 Metakaolin

Metakaolin je pucolán (přísada do maltovin), který vzniká kalcinací kaolinu $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ při teplotě okolo 750°C. Při této teplotě se vytváří vysoce reaktivní metakaolin, který obsahuje oxid hlinitý a oxid křemičitý v aktivní formě. Při vyšší teplotě tato reaktivita klesá.

Používá se jako částečná náhrada cementu, protože zvyšuje odolnost proti působení vody. Dále se používá jako přísada do omítek [29].

1.5.3 Popílky a strusky

Jedná se o heterogenní chemicky inertní materiály vysokým obsahem křemíku (40–60 %), hliníku a draslíku, jejichž složení je převážně SiO_2 a Al_2O_3 . Vznikají při spalování hnědého uhlí v tepelných elektrárnách. Používají se především jako aktivní příměs do betonu [29].

Struska je hrubozrnný černý materiál se skelným leskem. Obsahuje především SiO_2 , Al_2O_3 a H_2O . Vzniká při výrobě oceli, spalování uhlí, dřeva a odpadů (vysokopecní struska) nebo při vývěru lávy (vulkanická struska). Používá se ve stavebnictví jako plnivo do cementu, protože zvyšují pevnost v tahu, tlaku a odolnost vůči povětrnostním vlivům [30], [31].

1.5.4 Aktivátor

Aktivátor tvoří kapalnou složku geopolymery. Zaujímá 11–32 % hmotnosti geopolymery. Nejčastěji se jedná o tekuté sodné vodní sklo. Vodní sklo je 30–35% vodný roztok křemičitanu sodného. Jeho chemický vzorec je $\text{Na}_2\text{O} \cdot x\text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$. Kromě sodného vodního skla lze také použít draselné.

Vyrábí se tavením sklářského písku ve sklářské vanové peci při teplotě 1400–1600 °C za působení oxidu sodného nebo oxidu draselného. Následně se roztavený písek prudce chladí a rozpouští v hydroxidu sodném nebo draselném v autoklávu za vysoké teploty a tlaku. Tímto způsobem lze vyrábět všechny typy vodních skel.

Složení vodního skla je charakterizováno tzv. křemičitým modulem M , což je molární poměr $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$, který se běžně pohybuje v rozmezí 1,6–4,1. Dalšími charakteristikami vodního skla jsou hustota, viskozita a pH. Roztok vodního skla je silnou zásadou.

Dalšími běžnými aktivátory mohou být NaOH , Na_2SO_4 , Na_2CO_3 , K_2CO_3 , KOH nebo K_2SO_4 . Křemičitan sodný se už po staletí používá na výrobu komerčních produktů, jako např. speciálních cementů [32], [33].

1.6 Geopolymery Baucis

Baucis cement využívá jako surovinu kaolinitové jíly místo vápence. Jeho teplota výpalu je okolo 750 °C. Jsou vyráběny typy s různou počáteční a konečnou dobou tuhnutí. Počáteční doba se pohybuje v rozmezí 80–160 minut, zatímco konečná od 2 do 4 hodin.

České lupkové závody nabízejí několik druhů materiálů pro výrobu geopolymery, které se liší vlastnostmi a podmínkami tuhnutí. Nejběžnějšími jsou typy L a K, přičemž typ L je tzv. metalupek (amorfní struktura vzniklá vypálením lupku na 500–750 °C) a typ K je metakaolin (vzniká vypálením kaolinu). Dalšími zástupci jsou H, LD, FC či R.

Pro názornost geopolymery Baucis H110 je dvousložkové geopolymerní pojivo, jehož počáteční doba tuhnutí je 110 minut. Skládá se z cementu obsahujícího kalcinovaný úlet lupku a sodného alkalického aktivátoru [34], [35].

1.7 Elektrická a tepelná vodivost

Elektrická vodivost je fyzikální veličina, která popisuje schopnost materiálu vést elektrický proud. Vyjadřuje se z voltampérové charakteristiky jako převrácená hodnota elektrického odporu. Elektrickou vodivost látek lze rozlišit na iontovou a elektronovou, podle druhu nosiče proudu. Iontovou vodivost vždy doprovází transport hmoty. Vyskytuje se zejména v iontových krystalech, jako je sůl kamenná či chlorid stříbrný, nebo se může vyskytovat u některých skel. Se zvyšující se teplotou tato vodivost roste, protože přibývá počet iontů schopných pohybu. Představiteli elektrické vodivosti jsou kovy a polovodiče. S rostoucí teplotou roste měrný odpor kovu, zatímco elektrická vodivost klesá. U polovodičů pozorujeme opačný efekt, protože při zvyšující se teplotě vzniká větší množství volných elektronů. Mezi nejlepší vodiče elektrického proudu patří stříbro, měď, zlato či hliník [36].

Tepelná vodivost označuje schopnost materiálu vést teplo. Tuto vlastnost můžeme charakterizovat součinitelem tepelné vodivosti (λ), což je množství tepla, které projde za jednotku času tak, aby byl na jednotkovou délku také jednotkový teplotní spád. Vztah tepla (Q), plochy materiálu (S), jednotky času (τ) a teplotního spádu ($\Delta T/d$) lze vyjádřit tímto vztahem $Q = \lambda \cdot S \cdot (\Delta T/d) \cdot \tau$. Nejlepším vodičem tepelné energie je diamant. Za ním následuje stříbro, měď, zlato či hliník [37].

1.7.1 Měření elektrické vodivosti

Elektrická vodivost se zjišťuje přes voltampérovou charakteristiku. Při výpočtech se vychází z Ohmova zákona; $R_x [\Omega] = U_x [V] / I_x [A]$. R_x je elektrický odpor, U_x je úbytek napětí na měřeném odporu. Samotné měření se provádí buď zapojením odporu ampérmetru (sériově) a voltmetru (paralelně) do elektrického obvodu, nebo použitím multimetru, který má obě zařízení včetně ohmmetru zabudované [38].

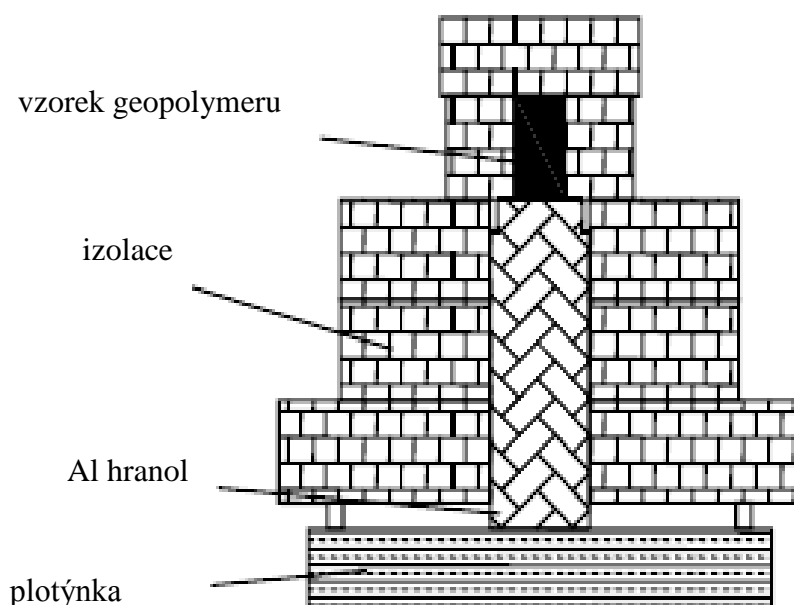
Elektrická vodivost je obrácená hodnota elektrického odporu; $G = 1/R [S]$ [39].

1.7.2 Měření tepelné vodivosti

Neexistuje přístroj, který by dokázal změřit tepelnou vodivost. Je proto třeba měřit jednotlivé veličiny, ze kterých je pak možné dopočítat součinitel tepelné vodivosti. V praxi se jedná o dva způsoby měření; stacionární (ustálené) a nestacionární (přechodové).

Princip stacionárního měření spočívá v prostupu tepla z vyhřívané části do studené části přes izolant (měřený vzorek). Podmínkou je, aby žádné teplo neunikalo do prostoru. Množství tepla získáme například převodem z energie spotřebované na vyhřívání. Existuje několik typů stacionárního měření, pojmenovaných podle svých vynálezců. Příkladem může být přístroj podle Poensgena a Bocka, Van Rinsuma či Nusselta.

Nestacionární měření spočívá na podobném principu. Zde je však okamžitý signál funkcí času. Měření je méně přesné, ale na druhou stranu umožňuje například sledovat vliv vlhkosti vzorku na jeho tepelnou vodivost [40], [41], [42].



Obrázek 4 Schéma měřicího přístroje pro určení tepelné vodivosti

1.8 Některá elektricky a tepelně vodivá aditiva

Měď je načervenalý kov, který má velké uplatnění především v elektrotechnice. Je poměrně odolná proti korozi a dobře tvárná za studena i tepla. Na vzduchu se však měď působením vlhkosti a oxidu uhličitého pokrývá tenkou vrstvou zelené měděnky ($\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2$). Tepelná vodivost mědi při 25 °C je $386 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, čímž se řadí na třetí místo po diamantu a stříbru. Stejně tak vede měď velmi dobře elektrický proud. Po cínu a hliníku má nejvyšší měrnou elektrickou vodivost. Mosaz (Cu + Zn) i bronz (Cu + Sn, Ni, Be, Ag, P) vykazují také velmi dobré vodivosti [43].

Grafit je černošedý na omak mastný minerál tvořený atomy uhlíku uspořádanými ve vrstvách. Jednotlivé vrstvy jsou spojeny slabou vazbou, zatímco atomy ve vrstvě jsou vázány velmi silnou kovalentní vazbou. Schopnosti vzájemného pohybu vrstev vůči sobě nebo jejich odlupování se využívá při výrobě tužek, mazadel, nátěrů a v elektrotechnice. Uhlík a jeho alotropní modifikace mají nejvyšší tepelnou vodivost, z nichž nejvyšší má diamant ($\lambda = 895\text{--}2300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) [43], [44].

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

2.1 Použité materiály

Plnivo a aktivátor

Mefisto K05 (firma ČLUZ) je žlutooranžový pucolán s velikostí částic řádově v jednotkách mikrometrů. Několik vzorků bylo připraveno také z pojiva **Baucis L160**.

Kapalnou složkou pro přípravu geopolymérů byl aktivátor Baucis L160 (firma ČLUZ). Jeho přesné složení je samozřejmě obchodním tajemstvím. Tento aktivátor byl navržen tak, aby ve spojení s pojivem Baucis L160 ve vhodném poměru obou komponent a teplotě 20 °C, byla jeho počáteční doba tuhnutí kratší než 160 minut. Pro mou práci však bylo nutné používat odlišné poměry s ohledem na existenci většího množství vodivé komponenty.

Vodivá aditiva

Hlavním cílem této práce bylo zjistit, zda mohou vhodná kovová aditiva ve formě prášku konkurovat grafitovému prášku, který v této oblasti vykazuje poměrně dobré výsledky. Pro své výborné vlastnosti byla vybrána **prášková měď**. Konkrétně se jedná o CuTEC50 s velikostí částic v průměru 38 μm s maximálně 1,5% obsahem tuků (mlecí přísada). Tento prášek je, jak uvádí dodavatel, nesmočitelný a neoxiduje.

Dále byl použit **bronzový prášek** s velikostí částic 35 μm. Tento světle zlatavý prášek vykazoval ve všech ohledech podobné vlastnosti jako použitá měď. Dodavatel však neuvádí další podrobnosti jako v případě mědi. Dalším použitým kovem byl **práškový hliník** ALPRA s nepravidelnými částicemi o velikosti okolo 65 μm. Jedná se o vysoce hořlavou látku stříbrošedé barvy.

Posledním z použitých kovů byl **nano-magnetit** s velikostí částic cca 20 nm, jehož magneticky přitahované částice tvořily až 2 μm agregáty. Kromě již zmíněných kovů má velký význam také grafit. Konkrétně byl vybrán jemně mletý **krystalický grafit** PAM od značky KOH-I-NOR, jehož částice měly průměr cca 25 μm.

Ostatní chemikálie

Syntapon L je prací přípravek s vysokou detergenční a dispergační účinností. Používá se především v textilním průmyslu při zušlechťovacích procesech.

HEMA (2-hydroxyethyl metakrylát, $\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)\text{COOCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$) je hydrofilní kapalina, jejíž hustota při 25 °C je 1,073 g/ml. Tato látka se používá jako příměs do běžných betonů, v nichž polymerizuje, a vytváří tak pojivo pro písek nebo šterk obsažený v maltě. Polymer na sebe navíc váže vodu, čímž ovlivňuje proces sušení a s ním spjaté konečné vlastnosti betonu [45].

2.2 Příprava vzorků a míchání

Správný poměr jednotlivých komponent a jejich dokonalé promísení je základem pro započetí geopolymerizace. Lze tedy předpokládat, že při nastavení špatného poměru či při nedostatečném míchání nezreaguje všechen materiál, což má za následek zhoršení mechanických vlastností vzniklého geopolymery.

Pro přípravu malého množství geopolymerní pasty je ideální nejprve smíchat pevnou složku s aktivátorem v třecí misce, a poté vmíchat další komponenty. Byla použita skleněná třecí miska se skleněným tloučkem, což však není vhodné, protože silně zásaditý aktivátor začíná po čase sklo naleptávat. Vzniklou pastu je třeba míchat a třít o stěny misky, dokud nedojde ke spojení komponent a rozrušení větších shluků.

Doba míchání se pohybovala v rozmezí 10–40 minut v závislosti na viskozitě a množství pasty. Kratší doba míchání se projevila nerovnoměrnější strukturou geopolymery, vznikem velkého množství bublin, tvarovými deformacemi uvnitř formy a zhoršením mechanických i vodivostních vlastností. Vzorky homogenizované míchačkou však ve výsledku měly lepší tepelnou vodivost (viz graf 8).

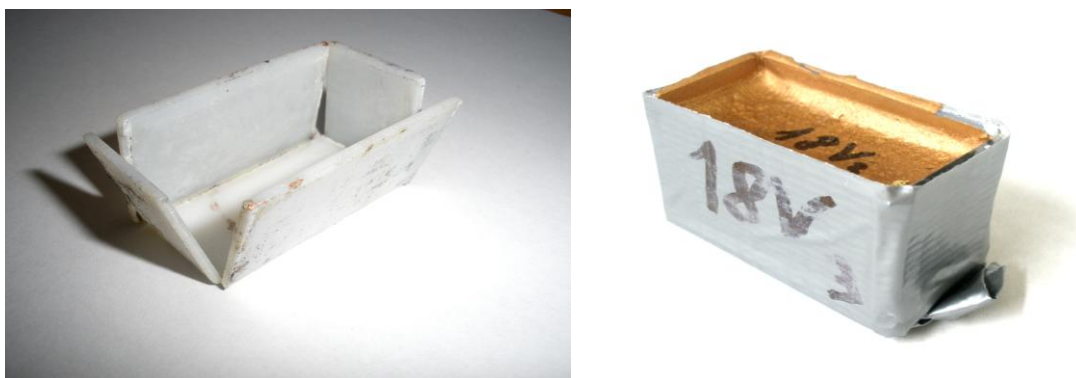


Obrázek 5 Speciálně upravený spirálovitý tvar lopatek

Takto byly připraveny dvě sady vzorků s poměrem metakaolinu:aktivátoru Baucis = 1:2 a 15hm% obsahem měděného prášku. Jeden vzorek byl homogenizován v třecí misce po dobu 30 minut, zatímco pro druhý vzorek se stejným poměrem komponent byla využita laboratorní míchačka IKA RW 16 basic po dobu 90 minut míchání při otáčkách 500/min. Vzorky se ve výsledku téměř nelišily, pouze druhý vzorek byl o něco křehčí. Použitý typ míchačky nebyl vhodný především tvarem svých lopatek, které pastu vytlačovaly nahoru a nedokázaly ji dostatečně promíchat.

Další variantou byla speciálně navržená míchačka s nakloněnými spirálovitými lopatkami uzpůsobenými tak, aby nevytlačovaly pastu. Tento přístroj pracoval s 60 otáčkami za minutu. Ani v tomto případě nedošlo k výraznému zlepšení zmíněných nedostatků. Podobný typ by byl využitelný pro přípravu velkého množství materiálu, který již neumožňuje ruční zpracování.

Vzniklá pasta se vlévala (v případě viskózních vzorků spíše vtlačovala) do připravených rozkládacích umělohmotných forem o rozměrech 4×2×2 cm. Formy byly dále opatřeny stříbrnou lepicí páskou, která měla za úkol zafixovat tvar formy a zároveň odolávat vysokým teplotám při sušení.



Obrázek 6 Prázdná forma (vlevo) a forma se vzorkem opatřená stříbrnou páskou

Při přípravě vzorků s obsahem mědi bylo velmi obtížné rovnoměrně rozprostřít měděný prášek do matrice obsahující pojivo a aktivátor. Prášek měl velmi drobné částice, takže měl tendenci poletovat při jakékoliv manipulaci. Při samotném míchání se pak shlukoval a tvořil na povrchu tenký film. Nikdy tedy nebylo možné jej rozprostřít dokonale rovnoměrně. Čím řidší byla matrice (čím větší byl poměr aktivátor:pojivo) tím obtížnější bylo zpracovat prášek do pasty.



Obrázek 7 Zpracovávání měděného prášku do matrice

Pokus o vyřešení tohoto problému spočíval v přidání povrchově aktivní látky, která by ojednotila částice a tím zabránila jejich shlukování. První povrchově aktivní látkou byl Syntapon. Přidáním pár kapek tohoto smáčedla do naváženého množství mědi a důkladným promícháním vznikla pasta, kterou potom bylo možné zakomponovat do matrice. Kromě Syntaponu byl použit také 2-hydroxyethyl metakrylát (HEMA).

Ani jedno z těchto aditiv však nemělo žádoucí efekt. Jejich přítomnost zvýšila viskozitu pasty a zároveň zvýšila množství výkvětů bílých solí (pravděpodobně krystalických sodných či vápenatých uhličitanů [46]), které se na povrchu některých vzorků objevily během sušení, viz obrázek 8. Další snahou o zajištění rovnoměrného obsahu mědi v matrici bylo použití ultrazvuku s cílem rozmíchat měděný prášek v aktivátoru pomocí ultrazvukové lázně. Ta však neměla na rozdispergování mědi žádný vliv. Vznikl kulovitý útvar podobný micelle, v jehož středu byly nesmočené částice kovu. Po zamíchání vznikl opět takovýto podobný útvar.



Obrázek 8 Výkvěty solí na povrchu vzorku



Obrázek 9 Prášková měď v aktivátoru

Stejné vlastnosti vykazoval i bronzový prášek. Grafít se oproti tomu poměrně dobře spojoval s matricí, což mohlo být dáno jeho strukturou. Velice vhodná se tedy jevila kombinace mědi, jakožto vodivého média, a grafítu jako spojovací hmoty udržující měď uvnitř matrice a přispívající svojí dobrou vodivostí. Kombinace nano-magnetitu s grafitem se také osvědčila, protože nebylo nutné použít velkého množství nano-magnetitu, který je, jako většina kovů, poměrně drahý (asi 3000 Kč/kg).

Dalším testovaným aditivem byl hliníkový prášek, který s aktivátorem prudce reagoval za vzniku velkého množství plynu (pravděpodobně vodíku), což se projevilo syčením a bubláním míchané směsi. Po ukončení chemické reakce vznikla černá tuhá porézní hmota podobná pemze.

2.3 Proces sušení

Po míchání a plnění do forem následuje proces sušení, které nemusí probíhat za zvýšené teploty. Při sušení probíhá geopolymerizace, geopolymerní pasta tuhne a vypařuje se poměrně velké množství nevázané vody. Tuhnutí postupuje od horního povrchu směrem dolů. Nejprve se vytvoří tenký film na povrchu vzorku, který postupem času zvětšuje svou tloušťku a tím prorůstá celým vzorkem. Často dochází k tvarové deformaci způsobené únikem vody.

Prudké vypařování má pravděpodobně za následek jeden z nejzávažnějších problémů, který se při inkorporaci kovového prášku do geopolymerní matrice objevuje. Ačkoliv má měděný prášek větší měrnou hmotnost ($8,94 \text{ g/cm}^3$) než voda (1 kg/m^3), při sušení docházelo k migraci ve směru vypařování vody. Intenzita migrace kovového prášku vedla v některých případech k rozdělení vzorku na dvě části. Tento jev je zdokumentován na obrázku 10A. Obrázek 10B znázorňuje pohled na lom jiného vzorku, ve kterém se měď usadila převážně v horní části a místy ve větších pórech.



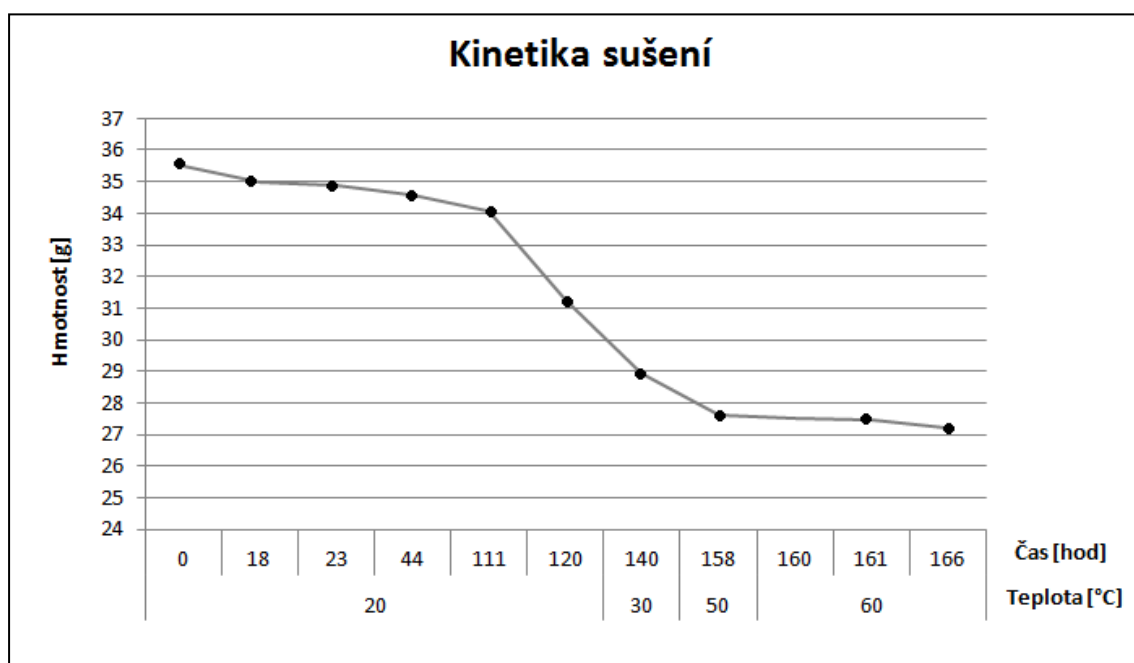
Obrázek 10A Vyplavení mědi na povrch
a vznik dvouvrstvého geopolymery



Obrázek 10B Lom vzorku s mědí
vyplavenou na povrch

Možným řešením by mohla být úprava způsobu sušení. Graf 1 popisuje kinetiku sušení vzorků, u nichž vyplavování mědi na povrch nebylo makroskopicky prokazatelné, ale které prokázal až snímek lomu. Vzorky byly nejprve přibližně 110 hodin sušeny ve formě (viz obrázek 6) při laboratorní teplotě 20 °C a relativní vlhkosti, která se pohybovala v intervalu 55–65 %. Za tuto dobu došlo k jejich dostatečnému ztuhnutí, a tak byly vyjmuty z formy a vloženy do laboratorní sušárny nastavené na 30 °C. Tato změna podmínek byla doprovázena rapidním snížením hmotností vzorků v průměru o 15–30 %, což bylo způsobeno vypařením velkého množství vody.

Na obr. 11 je pohled na lom vzorku, jehož kinetika sušení je znázorněna v grafu 1. Zde je patrné, že se měď po vyjmutí vzorku z formy usadila pouze na povrchu.



Graf 1 Kinetika sušení – poměr metakaolinu a akt. Baucis byl 1:4, obsah mědi = 35 hm%



Obrázek 11 Vyplavení mědi po celém povrchu vzorku

Obrázek 12A zobrazuje vzorek, u něhož nebyly po celou dobu sušení některé stěny formy odejmuty, takže pevně doléhaly ke stěnám vzorku, aby nedošlo k poškození hmoty vlivem nedostatečného ztuhnutí. Tyto uzavřené stěny pak zůstaly bílé, popřípadě šedé, bez přítomnosti částic mědi. Tato skutečnost byla potvrzena také snímky lomů těchto vzorků, viz obr. 12B.

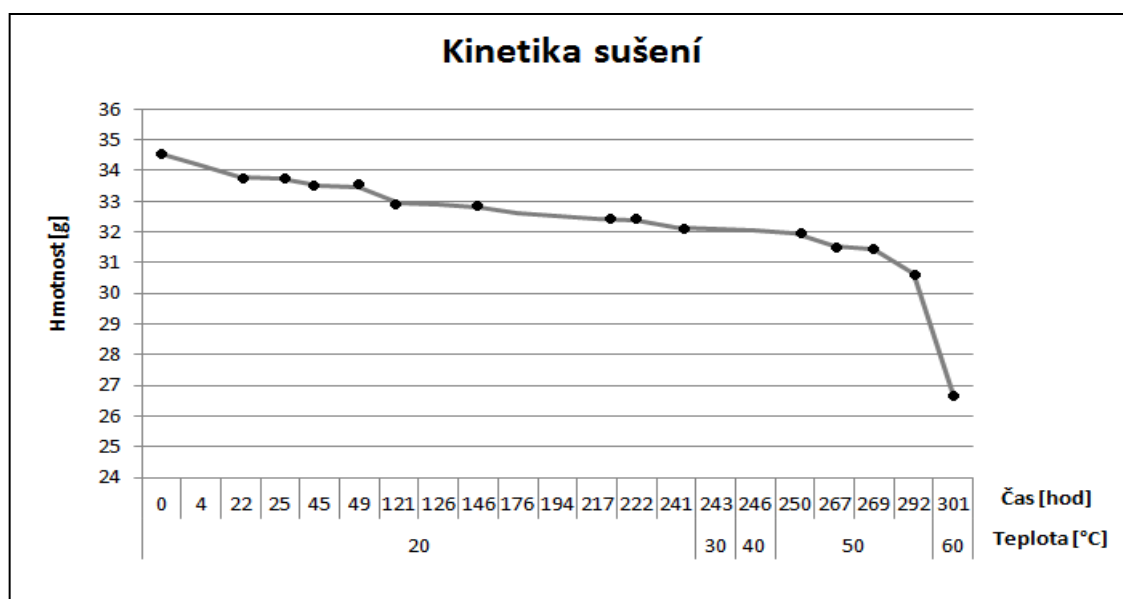


Obrázek 12A Vyplavení mědi směrem od stěn formy



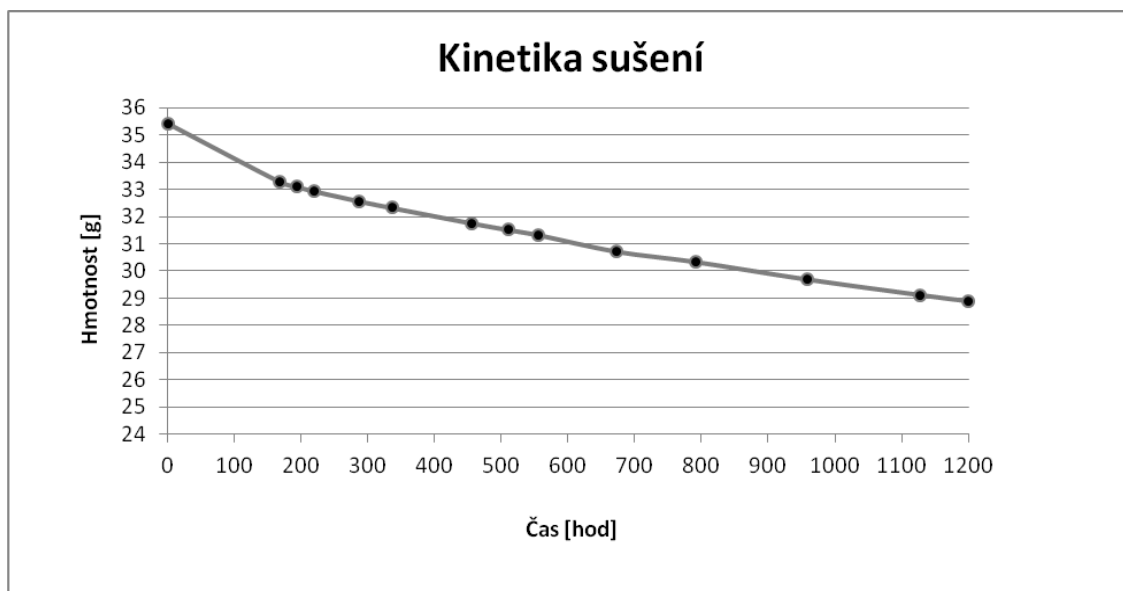
Obrázek 12B Lom vzorku s mědí vyplavenou od stěn formy

Mírnější způsob sušení sliboval omezení vyplavování mědi na povrch, viz graf 2. Proto byl nejprve zvolen takový způsob sušení vzorků, při kterém se zvýšila doba sušení při 20 °C na 240 hodin. Poté došlo k pozvolnému zvyšování teploty až na 60 °C. Opět je patrný pokles hmotnosti po vyjmutí vzorku z formy a zvýšení teploty. Tato varianta sušení však neměla žádoucí efekt. K omezení migrace mědi sice došlo, ale jen v malém měřítku.



Graf 2 Kinetika sušení – poměr metakaolinu a akt. Baucis byl 1:3, obsah mědi = 35 hm%.

Zmíněný čas byl nakonec zvýšen až na 50 dní. Po tuto dobu byly vzorky stále ve formě a jakékoliv manipulaci s nimi bylo zamezeno. Po 1200 hodinách byly z formy vyjmuty a dosušeny v laboratorní sušárně. Ačkoliv byl úbytek hmotnosti a s ním související vypařování vody poměrně pozvolný (viz graf 3), přesto došlo k maximálnímu vyplavení mědi na povrch.



Graf 3 Kinetika sušení – poměr metakaolinu a akt. Baucis byl 1:3, obsah mědi = 35 hm%.

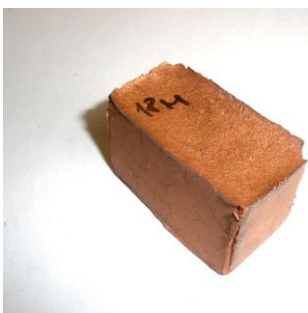
Pouhým prodloužením doby sušení při 20 °C tedy nedošlo ke snížení difuzního koeficientu, vyplývajícího z Fickova zákona. Některé vzorky byly proto na týden opatřeny polyethylenovou folií, která zamezila difuzi vody do méně koncentrovaného prostředí. Po týdnu byly vzorky vyjmuty z formy a dosušeny v sušárně standardním způsobem. Skutečně došlo k menšímu vyplavení mědi na povrch, ačkoliv stěny získaly spíše šedivou barvu. Po vyjmutí však začal horní povrch silně oxidovat. Zelená zoxidovaná vrstva je velmi dobře patrná na obrázku 13E.

Všechny zbylé vzorky byly sušeny nejprve jeden týden při teplotě 20 °C. Po vložení do sušárny byla teplota postupně zvýšena na 60 °C, načež byl vzorek vyjmut z formy. Přibližně další týdenní sušení při 60 °C způsobilo, že byla odstraněna veškerá volná voda, což se projevilo tím, že vzorek nadále vykazoval takřka nulový úbytek hmotnosti v čase. Postupným zvýšením teploty na 135 °C (během 3–7 hodin) bylo docíleno odstranění veškeré chemicky vázané vody. Takto vysušený vzorek byl připraven pro měření tepelné a elektrické vodivosti.

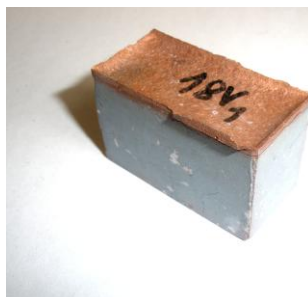
Obrázky 13 A, B, C, D a E zachycují různé formy vzorku téhož složení, které jsou připraveny různými způsoby homogenizace použitých složek. Hmotnostní poměr metakaolinu a aktivátoru Baucis byl vždy 1:2 a obsah měděného prášku činil 15 hm%.



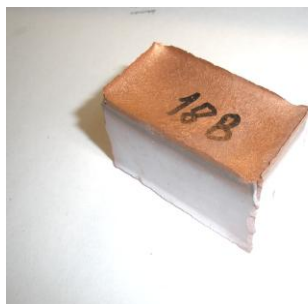
Obrázek 13A Ruční míchání. Kinetika sušení je zobrazena na grafu 1.



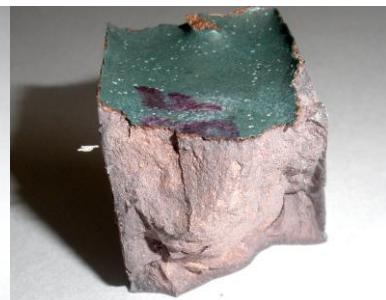
Obrázek 13B Homogenizace laboratorní míchačkou. Kinetika sušení je zobrazena na grafu 1.



Obrázek 13C Ruční míchání. Kinetika sušení je zobrazena na grafu 3.



Obrázek 13D Homogenizace laboratorní míchačkou. Kinetika sušení je zobrazena na grafu 2.



Obrázek 13E Ruční míchání, kinetika sušení podle grafu 2. Vzorek byl zabalen v PE folii.

2.4 Měření tepelné vodivosti vzorků

2.4.1 Princip měření tepelné vodivosti

Orientační měření tepelné vodivosti probíhalo přibližně způsobem znázorněným na schématu zobrazeném na obr. 4. Cílem měření nebylo zjistit přesnou hodnotu tepelné vodivosti, tedy součinitel λ , ale spíše navzájem porovnat připravené vzorky.

Měřicí zařízení se skládalo z běžné plotýnky, jejíž teoretická maximální teplota činila 240 °C. Skutečná nejvyšší teplota se však pohybovala kolem 200 °C. Do středu plotýnky byl postaven 6 cm vysoký ocelový kužel bez špičky. V horní části těsně pod okrajem měl tenký asi centimetr hluboký otvor, do něhož byly vsunuty dva kontaktní dráty připojené na termometr DTM-319. Jeden z nich sloužil jen pro kontrolu. Na kužel byl postaven měřený vzorek s rozměry přibližně odpovídajícími velikosti používané formy.

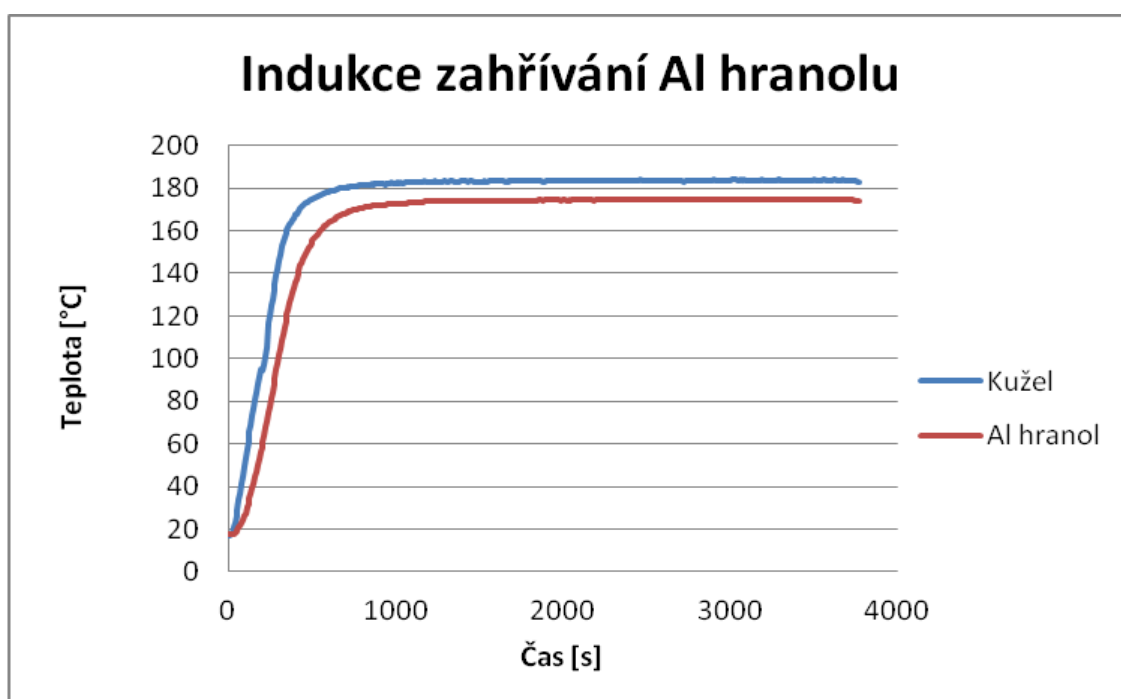
Přímá dotyková sonda TPK-04S připojená na snímač teploty od stejného výrobce odečítala teplotu na opačné ploše vzorku. Termometr zaznamenával a ukládal hodnoty teplot horních ploch ocelového kužele a geopolymerního hranolu.



Obrázek 14 Měření tepelné vodivosti

Nejdůležitější podmínkou přesného měření bylo dokonalé zbroušení dotykových ploch geopolymery. I milimetrová vzduchová mezera zásadně zhoršovala tepelnou vodivost. Pro účel porovnání tepelných vlastností nebylo potřeba používat izolaci. Každý vzorek měl navíc jiný tvar daný deformací způsobenou odpařováním vody při sušení. Izolace tedy nesplňovala základní požadavky.

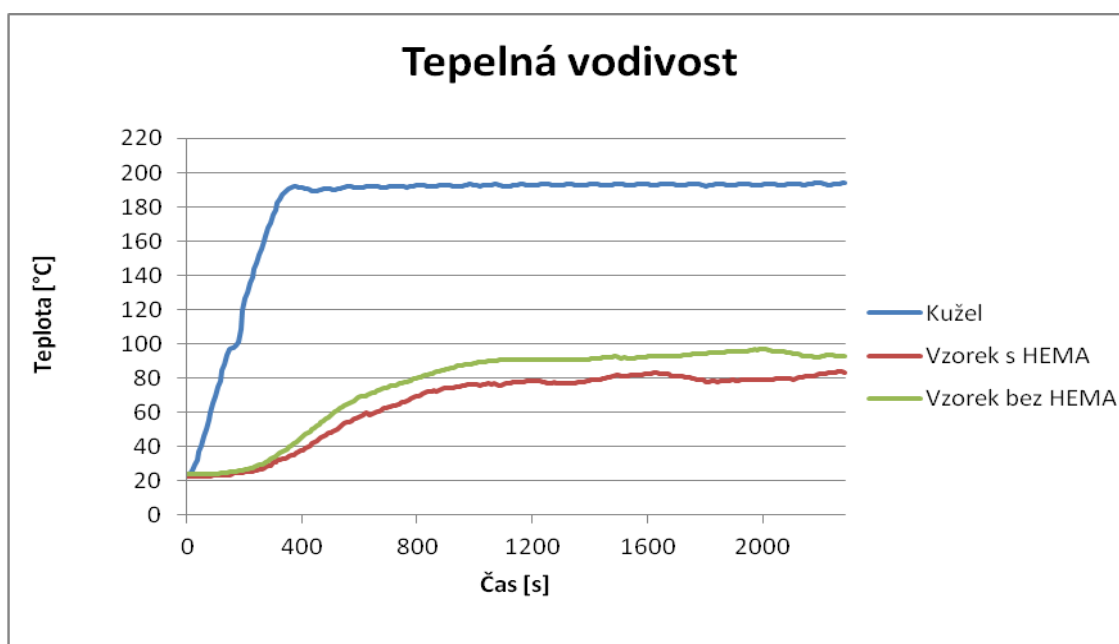
Vodivost měřených vzorků lze porovnat s vodivostí hliníkového hranolu se stejnými rozměry, jako byly rozměry používané formy. Na grafu 4 je indukce zahřívání Al hranolu (červená křivka), která roste spolu se zvyšující se teplotou na horní ploše vyhřívaného ocelového kužele (modrá křivka).



Graf 4 Indukce zahřívání Al hranolu a ocelového kuželu v závislosti na čase

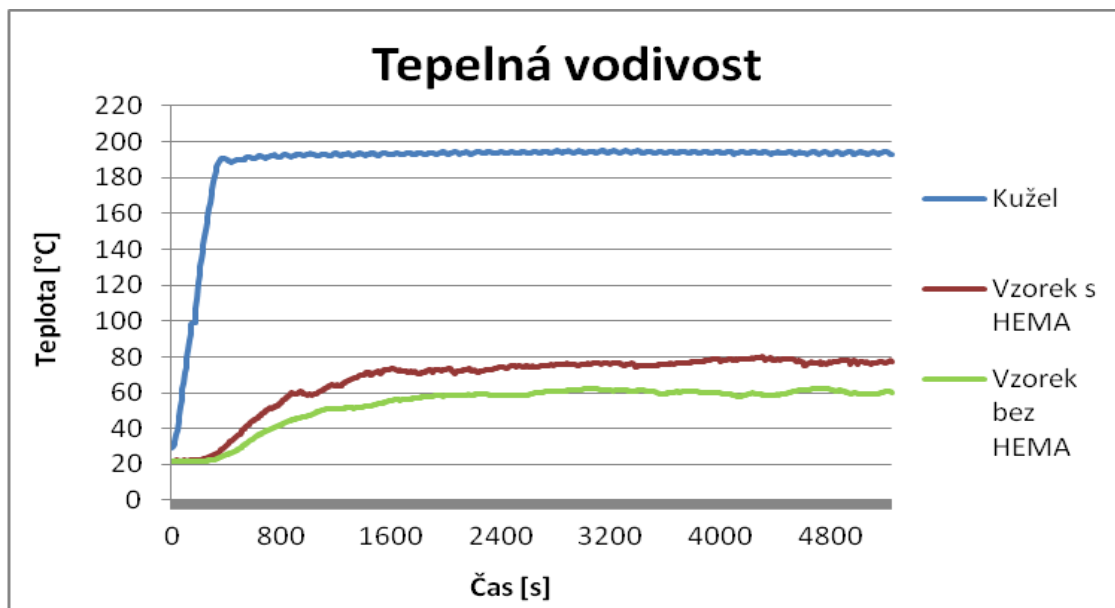
2.4.2 Výsledky měření tepelné vodivosti

Byla provedena řada měření různých typů vzorků lišících se poměrem komponent i způsobem přípravy. Všeobecně lze říci, že se tepelná vodivost vzorků s obsahem mědi a bronzu příliš nelišila. Grafy 5 a 6 porovnávají tepelnou vodivost dvou takřka identických geopolymérů. Oba vzorky byly sušeny metodou odpovídající grafu 1.



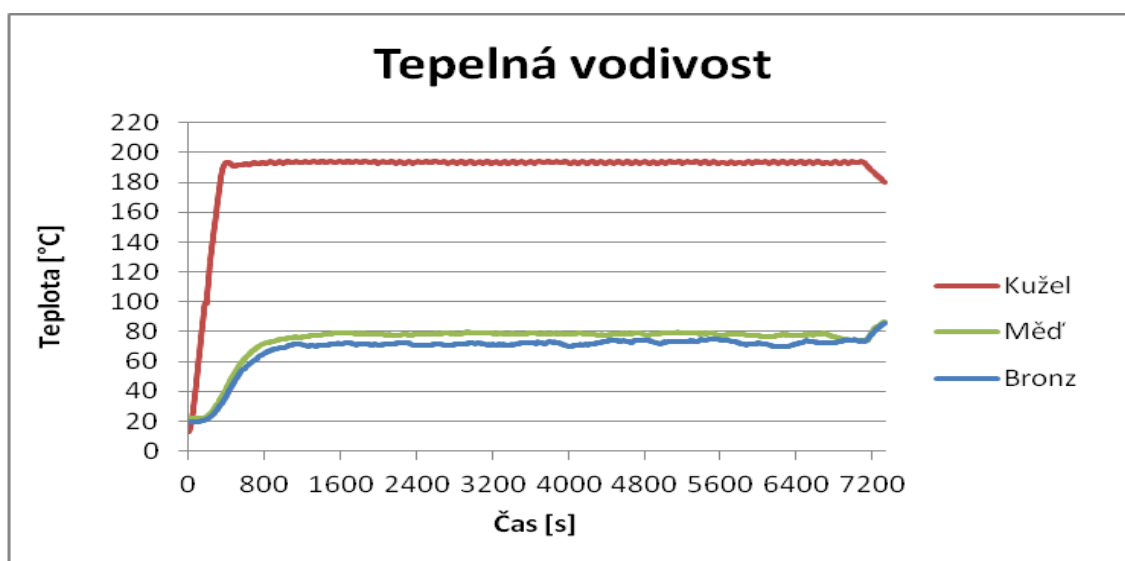
Graf 5 Porovnání tepelné vodivosti vzorku s obsahem HEMA a bez něj. Poměr metakaolinu a aktivátoru byl 1:2 a obsah mědi činil 16 hm%.

Zelená křivka označuje průběh prohřívání vzorku, jehož poměr metakaolinu a aktivátoru Baucis činil 1:2 a obsah mědi byl 16 hm% (viz graf 5). Zelená křivka v grafu 6 pak popisuje vzorek s poměrem metakaolinu a aktivátoru 3:4 a 9 hm% mědi. Geopolymery, charakterizované v grafech 5 a 6 červenými křivkami, mají stejný poměr komponent. Liší se pouze recepturou, konkrétně tím, že byla měď přidána do matrice až poté, co z ní byla vytvořena pasta smícháním s 2-hydroxyethyl metakrylátem. Z grafů je patrné, že přítomnost HEMA nemá přímý vliv na zvýšení tepelné vodivosti. V prvním případě vykazuje vzorek s obsahem HEMA horší vodivost, kdežto v druhém grafu tato vodivost vzrostla.



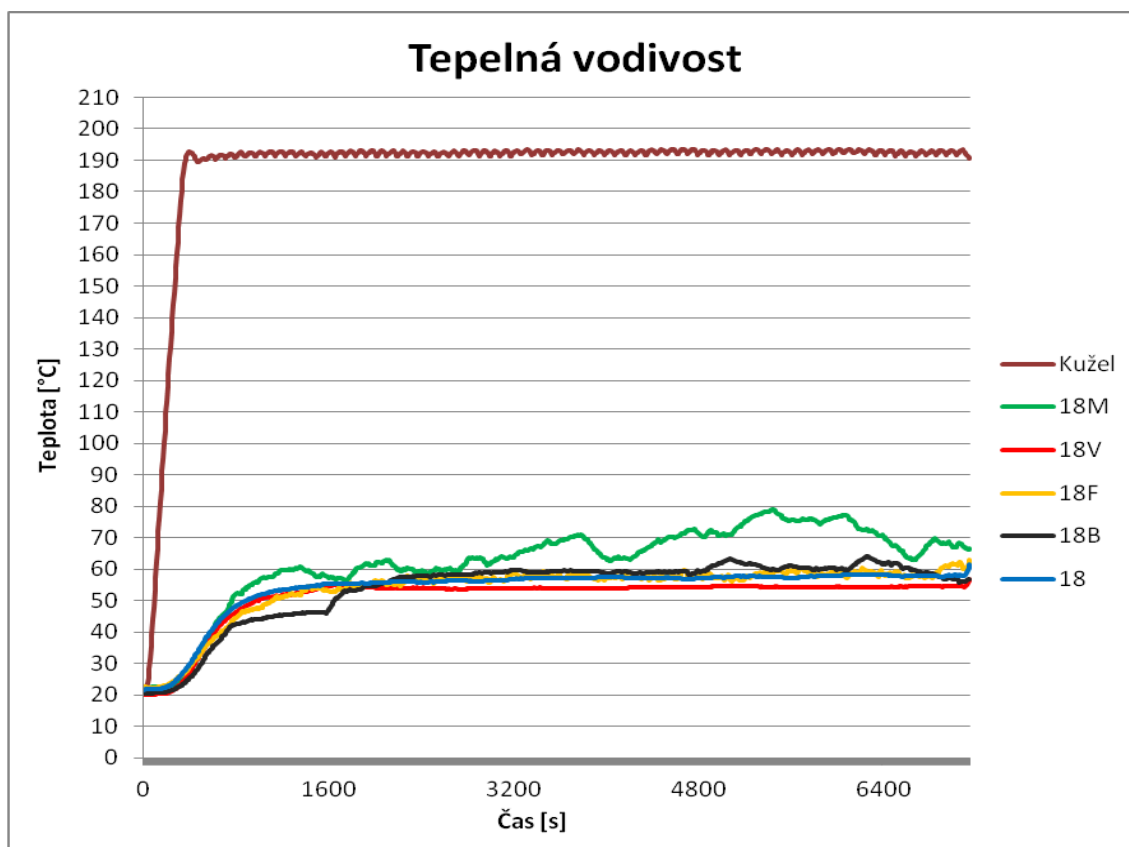
Graf 6 Porovnání tepelné vodivosti vzorku s obsahem HEMA a bez něj. Poměr metakaolinu a aktivátoru byl 3:4 a obsah mědi činil 9 hm%.

Porovnání tepelné vodivosti vzorku s obsahem mědi a téhož vzorku s obsahem bronzu znázorňuje graf 7. V tomto případě se jedná o geopolymery s poměrem metakaolinu a aktivátoru 1:3 a 35 hm% vodivé komponenty. Oba vzorky byly připraveny totožným způsobem. Po 90 minutovém míchání laboratorní míchačkou IKA RW 16 basic byly 300 hodin sušeny (viz graf 2). Oba vzorky se prohřály na téměř stejnou teplotu, přičemž lepší vodivost vykazuje podle očekávání geopolymer s obsahem mědi.



Graf 7 Porovnání tepelné vodivosti vzorků s poměrem metakaolinu a aktivátoru 1:3, s 35 hm% mědi (zelená křivka) a 35 hm% bronzu (modrá křivka)

Vliv způsobu míchání a sušení na tepelnou vodivost geopolymeru s 15% hmotnostním podílem práškové mědi lze pozorovat na grafu 8. Tento graf zobrazuje tepelnou indukci pěti totožných vzorků, v jejichž případě činí poměr metakaolinu a aktivátoru Baucis 1:2. Vzorek označený číslem 18 je zobrazen obrázkem 13A. 18M odpovídající obrázkem 13B byl homogenizován laboratorní míchačkou. Obrázek 13C popisuje geopolymer s číslem 18B. Vzorek 18V, který byl sušen po dobu 50 dní, nalezneme na obrázkem 13D a poslední je 18F, který je popsán na obrázkem 13E.

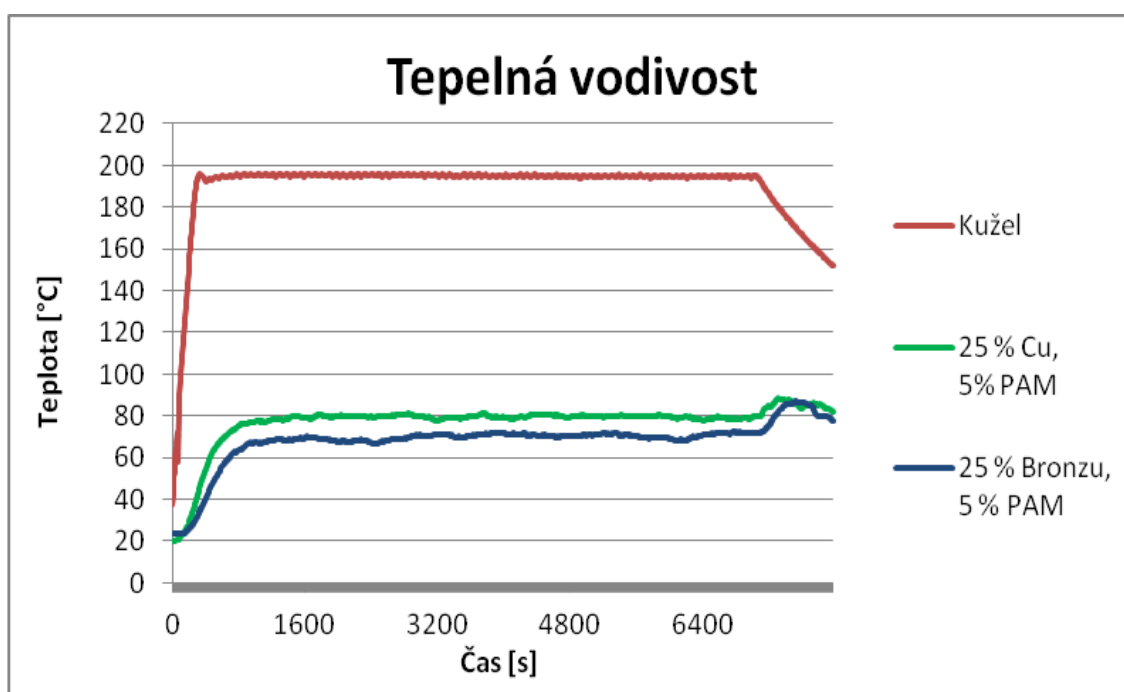


Graf 8 Porovnání vzorků se stejným poměrem komponent lišících se způsobem přípravy. Poměr metakaolinu a aktivátoru byl 1:2 a obsah mědi činil 15 hm%.

Z grafu vyplývá, že nejvyšší vodivosti dosahuje vzorek homogenizovaný laboratorní míchačkou. Teplota, na kterou se postupně vyhřívá, však velmi kolísá. Ostatní vzorky dosahují velmi podobných teplot. Rozdíly teplot lze připisovat vzduchové mezeře mezi dotykovými plochami ocelového kužele a geopolymeru, otřesům či špatné manipulaci se vzorky během jejich sušení a v neposlední řadě také nedostatečně intenzivní homogenizaci.

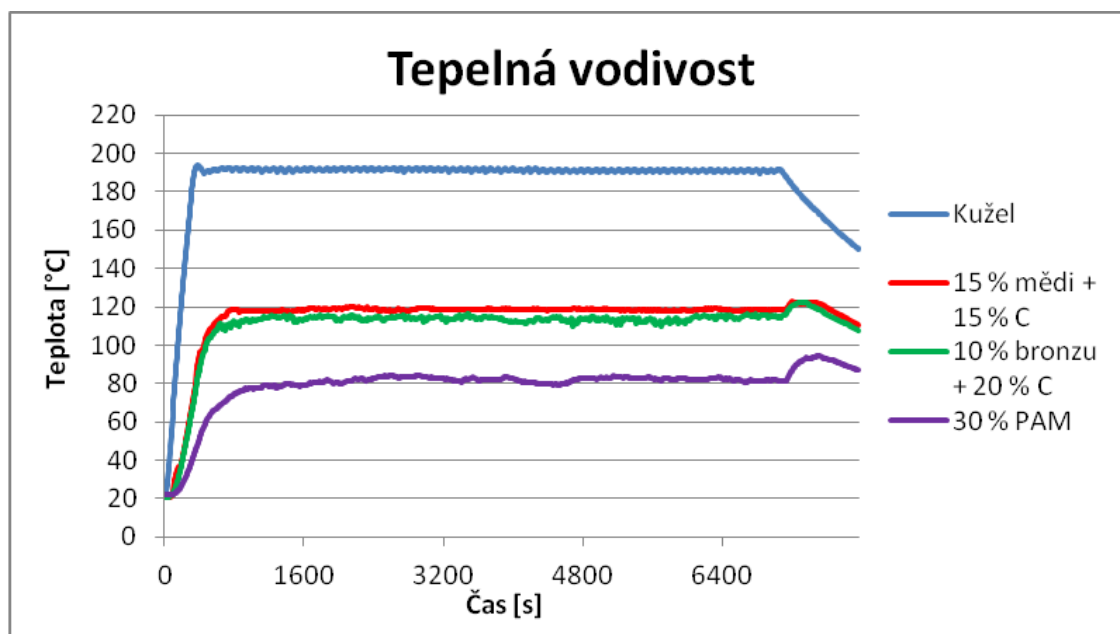
Vzorky, které obsahují kromě mědi či bronzu také příměs grafitu, vykazují mnohem vyšší tepelnou vodivost. Při správném poměru komponent se tyto geopolymery prohřejí až o 30 °C více, než vzorky s obsahem pouze kovové nebo pouze grafitové složky. Graf 9 porovnává tepelnou vodivost dvou vzorků, které mají 30hm% podíl vodivé komponenty sestávající z kovového a grafitového prášku.

Zelená křivka dosahuje vyšších teplot než modrá, což znamená, že vzorek s 25 hm% mědi a zbývajících pěti procenty grafitu má lepší tepelnou vodivost než vzorek se stejným poměrem komponent, který obsahuje bronz namísto mědi.



Graf 9 Porovnání tepelné vodivosti vzorků s poměrem metakaolinu a aktivátoru 1:4, s 25 hm% mědi a 5 hm% grafitu (zelená křivka) a podobný vzorek s 25 hm% bronzem a 5 hm% grafitu (modrá křivka)

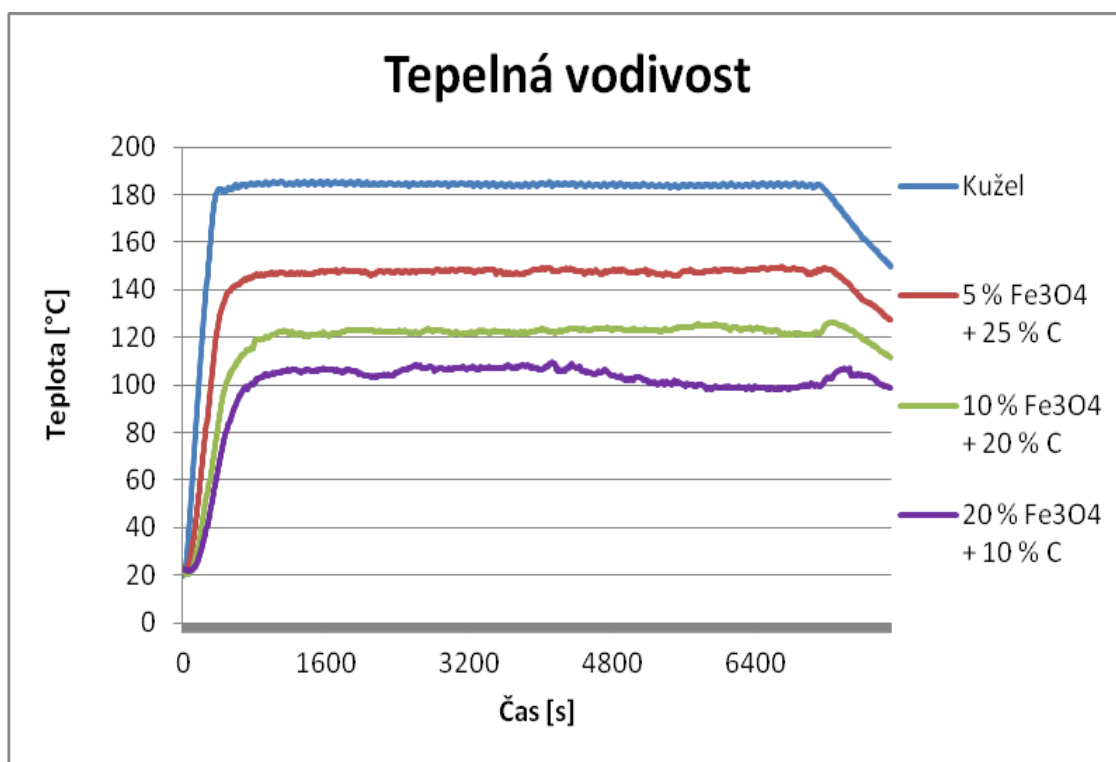
Porovnání vzorků kombinujících příměs kovového a grafitového prášku se vzorkem čistě grafitovým nalezneme na grafu 10. Červená a zelená křivka popisují indukcii zahřívání geopolymérů s obsahem kovu a grafitu v celkovém množství 30 hm%. Tyto křivky převyšují fialovou křivku grafitového vzorku v průměru o téměř 40 °C. Bronzový geopolymér dosahuje nepatrně nižších teplot než měděný, což může být dáno jednak nižší tepelnou vodivostí použitého kovu a jednak nedostatečným zbrúšením dotykových ploch.



Graf 10 Porovnání vzorků s poměrem metakaolinu a aktivátoru Baucis 1:7 a 30 hm% mědi a grafitu (červená křivka), 30 hm% bronzu a grafitu (zelená křivka) a 30 hm% grafitu (fialová křivka)

Nejlepších vlastností dosáhly vzorky kombinující nano-magnetitový a grafitový prášek v celkovém hmotnostním podílu 30 hm%. Graf 11 porovnává tři z nich, které mají poměr pevné a kapalné komponenty v matrici 1:7. Červená křivka reprezentuje vzorek s nejlepší naměřenou tepelnou vodivostí, jehož obsah nano-magnetitu činil 5 hm% a zbytek tvořil grafit PAM. Tento geopolymér zároveň vykazoval velmi dobré mechanické vlastnosti. Během sušení však došlo k tvorbě množství velkých bublin, které se odrazily především na jeho výsledném tvaru.

Se zvyšujícím se obsahem nano-magnetitu při stávajícím poměru komponent geopolymerní matrice se tepelná vodivost připravených vzorků snižovala (zelená a fialová křivka). Tento jev patrně nebyl způsoben charakterem kovového prášku, protože v prvním vzorku tento prášek výrazně dopomohl ke zvýšení vodivosti. Příčinou byl s největší pravděpodobností nevhodný poměr metakaolinu a aktivátoru, který byl příliš vysoký. Grafit totiž výrazně zvyšoval viskozitu geopolymerní pasty, takže snížení jeho obsahu v ní vedlo při zachování poměrů ostatních komponent ke snížení viskozity. To mělo pravděpodobně za následek horší průběh geopolymeryzace a špatný kontakt mezi částicemi vodivého prášku vlivem vzniklých vad a bublin ve struktuře geopolymerního.



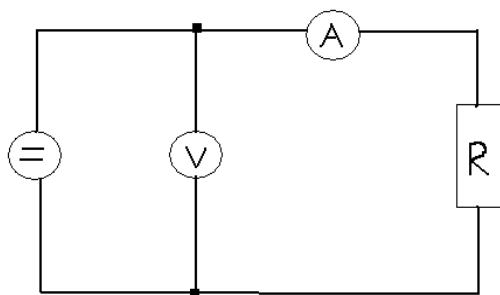
Graf 11 Porovnání vzorků s poměrem metakaolinu a aktivátoru Baucis 1:7 a 30 hm% vodivých komponent, z nichž tvořil nano-magnetit 5 hm% (červená křivka), 10 hm% (zelená křivka) a 20 hm% (fialová křivka) a zbytek tvořil vždy grafit PAM.

2.5 Měření elektrické vodivosti

2.5.1 Princip měření elektrické vodivosti

Důležitou podmínkou pro zajištění co nejpřesnějšího měření elektrické vodivosti bylo, stejně jako v případě tepelné vodivosti, zajistit hladké a rovné kontaktní plochy vzorků. Na tyto stěny totiž těsně doléhaly elektrody přitlačované ke vzorku soustavou pružin. Elektrody byly připojeny do multimetru, který ukazoval proud procházející obvodem znázorněným na obrázku 15.

Druhý paralelně připojený multimetr pak měřil okamžité napětí stejnosměrného zdroje proudově omezeného na 6 A. Podílem napětí a proudu podle Ohmova zákona získáme elektrický odpor R , jehož převrácená hodnota je elektrická vodivost.

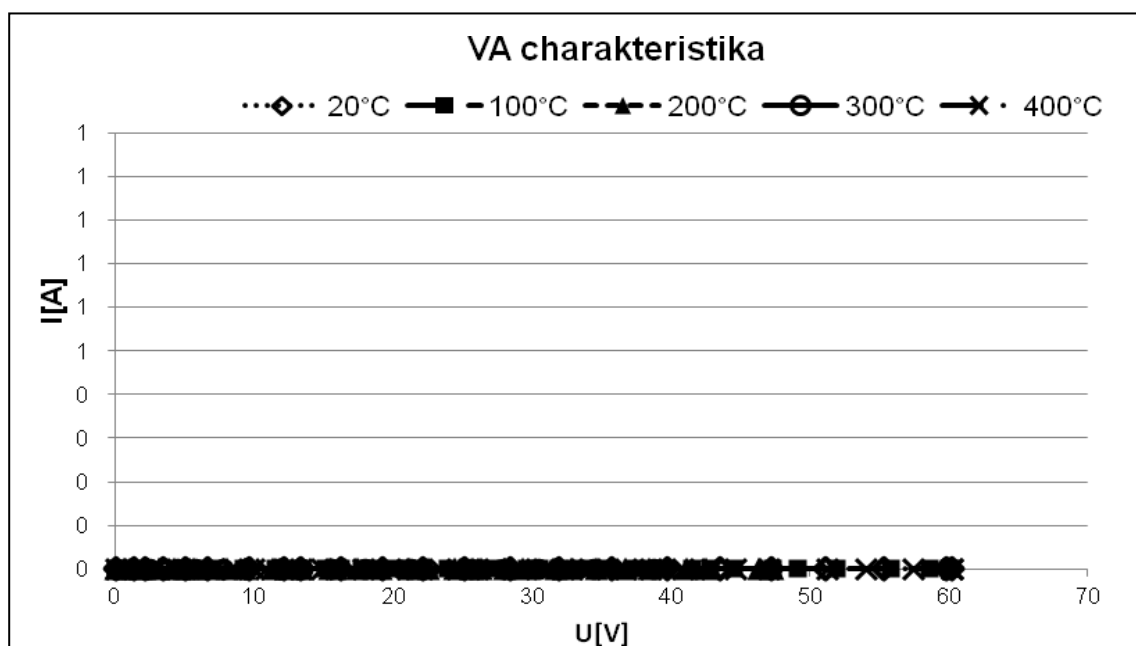


Obrázek 15 Schéma měření el.
vodivosti

Hodnoty byly odečítány se zvyšující se teplotou, a to při 20, 100, 200, 300 a 400 °C. Při zvýšení teploty bylo vždy nutné počkat několik minut, aby se vzorek dostatečně prohřál. Výsledkem je voltampérová charakteristika zobrazující hodnoty elektrického odporu měnícího se při zvyšující se teplotě.

2.5.2 Výsledky měření elektrické vodivosti

Všechny vzorky s obsahem mědi měly povahu elektrických izolantů. Jejich elektrický odpor tedy nebylo možné určit, protože jimi neprotékal žádný zaznamenatečný proud. Navíc se ukázalo, že si po vystavení teplotám dosahujícím 400 °C sice udržely relativně dobré mechanické vlastnosti oproti vzorkům s pouhým obsahem grafitu, ale docházelo k silné oxidaci mědi doprovázené změnou barvy. Vzorky tak získaly naředlou barvu a výrazně zkrěhly. Oproti grafitovým vzorkům se však na jejich povrchu neobjevily žádné výrazné pukliny.



Graf 11 Voltampérová charakteristika měděného vzorku

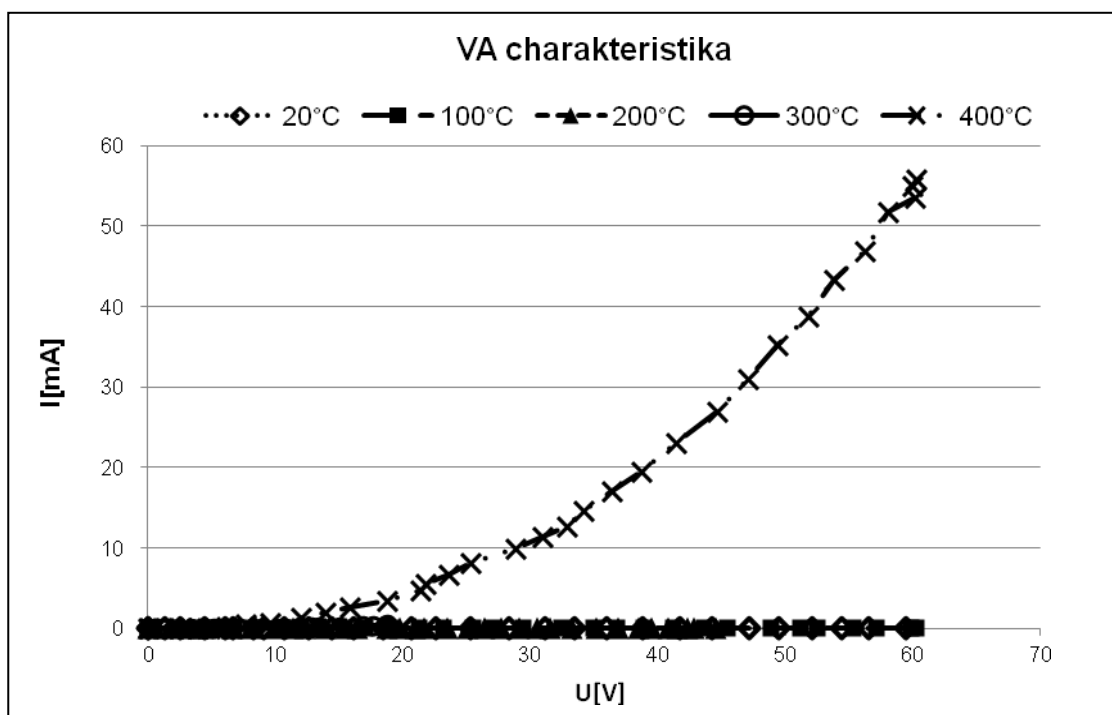


Obrázek 16 Porovnání téhož vzorku před (vlevo)
a po měření el. vodivosti (vpravo)

Vzorky s obsahem kovového prášku a grafitu PAM vykazovaly o poznání lepší výsledky než předchozí. Rezistivita geopolymery, jehož vodivým aditivem je měď a grafit, je zobrazena na tabulce 1 a grafu 13. Z tabulky vyplývá, že nejmenší elektrický odpor a tudíž největší elektrickou vodivost má vzorek při 400 °C. Průměrný odpor byl převeden na měrný odpor pomocí vzorce $\rho = (R \cdot S) / l$. Obrácená hodnota měrného odporu je pak elektrická vodivost (konduktivita).

25 hm% Cu, 5 hm% C, rozměry 3,5×1,8×2 cm			
	Průměrný odpor [Ω]	Měrný odpor [Ω·m]	Konduktivita [S·m ⁻¹]
20 °C	7219626,28	74259,01	$1,35 \cdot 10^{-5}$
100 °C	3136802,76	32264,26	$3,10 \cdot 10^{-5}$
200 °C	1978932,24	20354,73	$4,91 \cdot 10^{-5}$
300 °C	170547,78	1754,21	$5,70 \cdot 10^{-4}$
400 °C	31421,53	323,19	$3,09 \cdot 10^{-3}$

Tabulka 1 Elektrická vodivost vzorku s poměrem metakaolinu a aktivátoru 1:4, 25 hm% mědi a 5 hm% grafitu

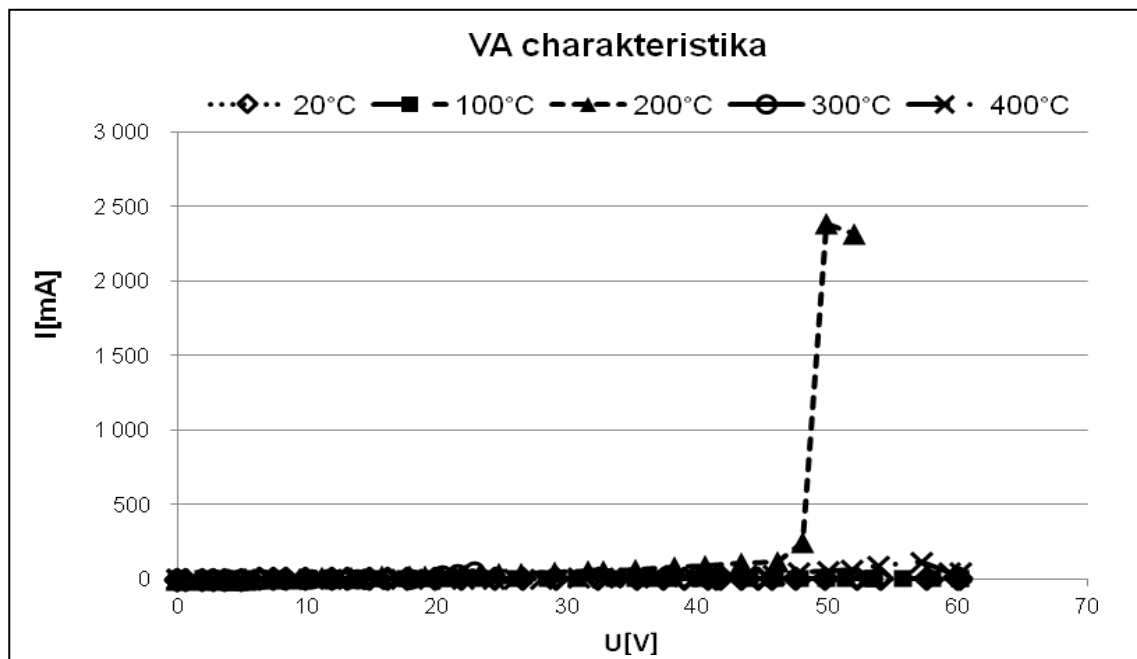


Graf 12 Voltampérová charakteristika vzorku s poměrem metakaolinu a aktivátoru 1:4, 25 hm% mědi a 5 hm% grafitu

Tentýž vzorek, který obsahuje bronzový prášek namísto měděného, má hodnoty odporu pohybující se téměř ve stejných jednotkách. Tyto hodnoty se však liší s rostoucí teplotou. Tento vzorek má při každé teplotě lepší elektrickou vodivost než vzorek předchozí.

25 hm% bronzu, 5 hm% C, rozměry 3,8×1,8×1,7 cm			
	Průměrný odpor [Ω]	Měrný odpor [$\Omega \cdot m$]	Konduktivita [$S \cdot m^{-1}$]
20 °C	456689,76	3881,86	$2,58 \cdot 10^{-4}$
100 °C	29900,67	254,16	$3,93 \cdot 10^{-3}$
200 °C	634,50	5,39	0,19
300 °C	8264,81	70,25	0,01
400 °C	6670,87	56,70	0,02

Tabulka 2 Elektrická vodivost vzorku s poměrem metakaolinu a aktivátoru 1:4, 25 hm% bronzu a 5 hm% grafitu

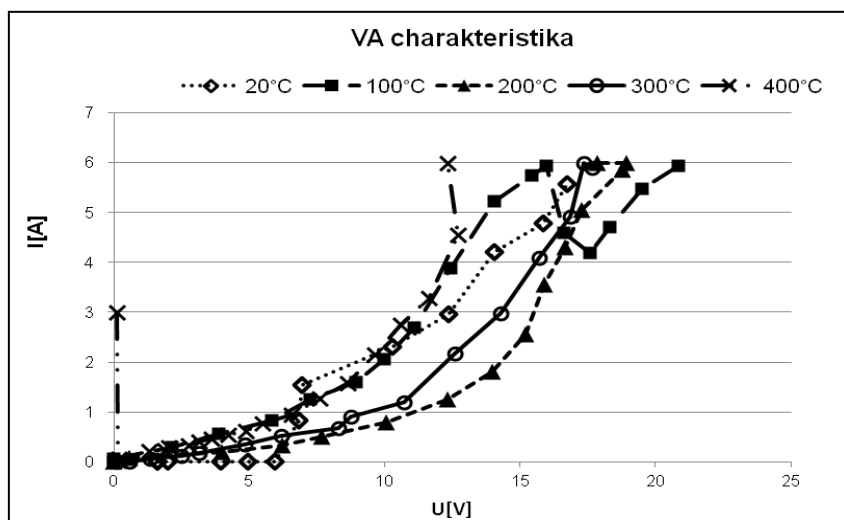


Graf 13 Voltampérová charakteristika vzorku s poměrem metakaolinu a aktivátoru 1:4, 25 hm% bronzu a 5 hm% grafitu

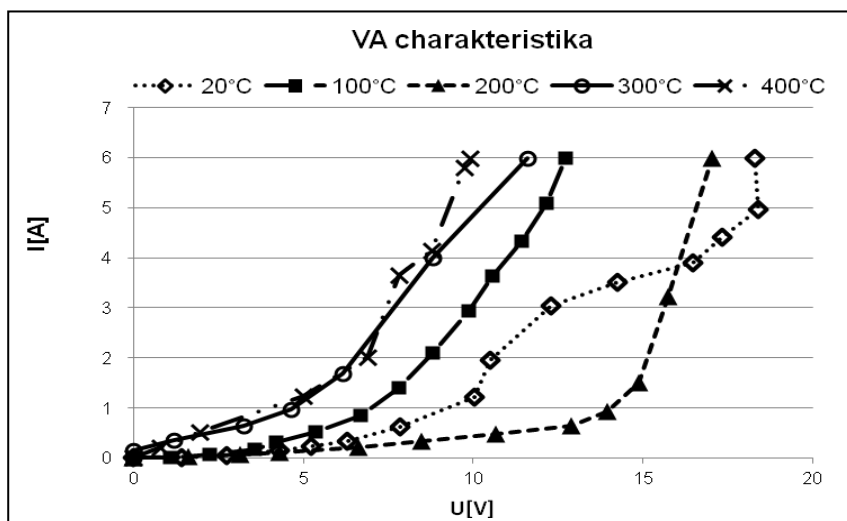
Vzorky kombinující měď nebo bronz s grafitem při poměru metakaolinu a aktivátoru 1:7 dosáhly lepších výsledků v oblasti tepelné vodivosti než vzorek obsahující pouze grafit. Podobně je na tom také jejich elektrická vodivost. V porovnání s grafitovým si navíc při všech teplotách zachovaly své výborné mechanické vlastnosti. Na jejich povrchu se oproti grafitovému vzorku opět neobjevily žádné praskliny.

15 hm% mědi + 15 hm% grafitu, rozměry 3,8×1,8×2,1 cm			
	Průměrný odpor [Ω]	Měrný odpor [$\Omega \cdot m$]	Konduktivita [$S \cdot m^{-1}$]
20 °C	4668,83	46,44	0,02
100 °C	4,22	0,04	23,80
200 °C	8,44	0,08	11,92
300 °C	17,92	0,18	5,61
400 °C	5,59	0,06	17,99
10 hm% bronzu + 20 hm% grafitu, rozměry 3,6×1,9×2,2 cm			
	Průměrný odpor [Ω]	Měrný odpor [$\Omega \cdot m$]	Konduktivita [$S \cdot m^{-1}$]
20 °C	17,53	0,20	4,91
100 °C	14,29	0,17	6,03
200 °C	22,16	0,26	3,89
300 °C	3,018	0,04	28,63
400 °C	2,81	0,03	30,61
30 hm% grafitu, rozměry 3,6×1,9×2,3 cm			
	Průměrný odpor [Ω]	Měrný odpor [$\Omega \cdot m$]	Konduktivita [$S \cdot m^{-1}$]
20 °C	25,31	0,31	3,25
100 °C	21,52	0,26	3,83
200 °C	14,73	0,18	5,59
300 °C	14,99	0,18	5,50
400 °C	33,50	0,41	2,46

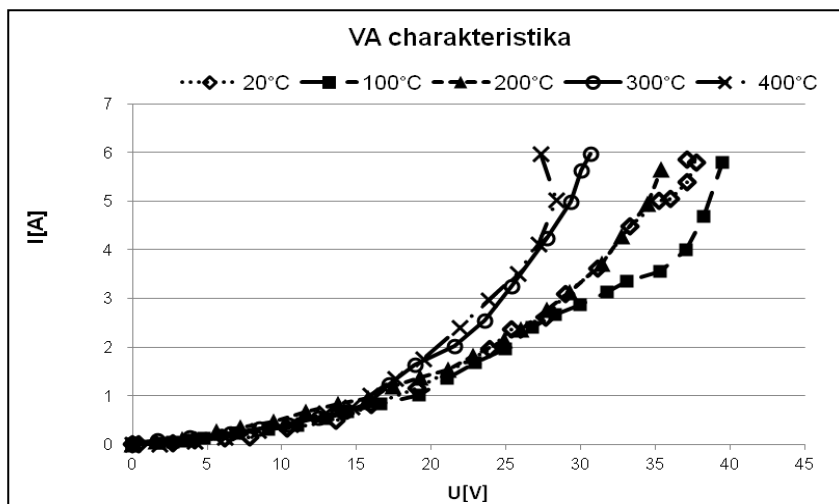
Tabulka 3 Porovnání průměrných a měrných odporů a el. vodivosti vzorků s poměrem metakaolinu a aktivátoru 1:4 a 30 hm% vodivé komponenty



Graf 15 Voltampérová charakteristika:
metakaolin:aktivátor = 1:7, 15 hm% Cu, 15 hm% C



Graf 16 Voltampérová charakteristika:
metakaolin:aktivátor = 1:7, 10 hm% bronz, 20 hm% C

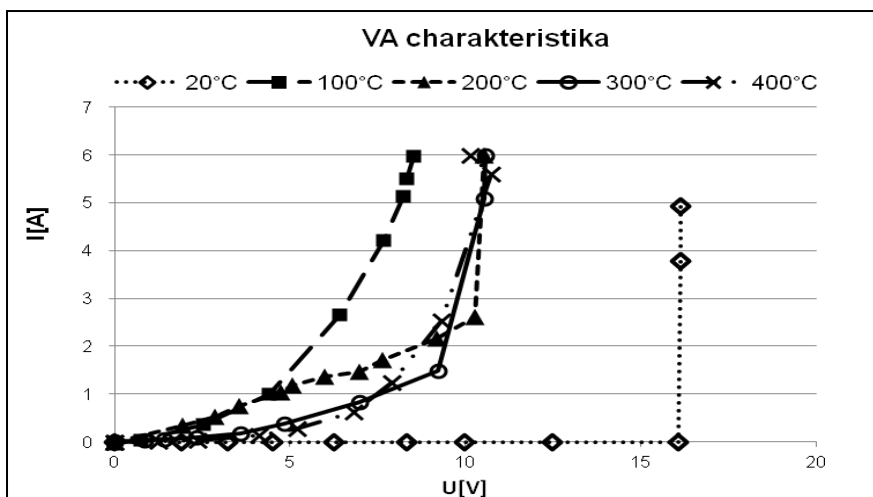


Graf 17 Voltampérová charakteristika:
metakaolin:aktivátor = 1:7, 30 hm% C

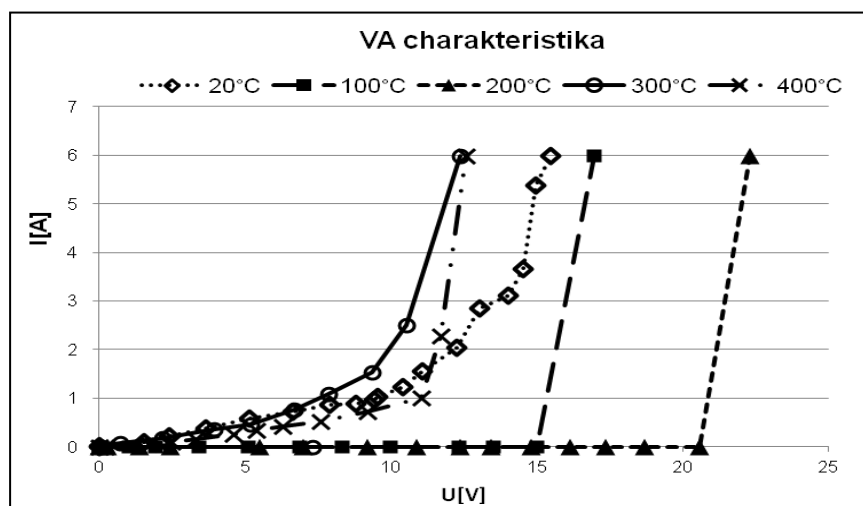
Stejně jako v případě měření tepelné vodivosti vzorků s obsahem mědi a grafitu dosáhl nejlepších výsledků ze vzorků obsahujících nano-magnetit geopolymery s 5 hm% kovu doplněným 25 hm% grafitu. Jeho elektrická vodivost klesá se zvyšující se teplotou patrně vlivem oxidace kovu. Vzorky s vyšším obsahem nano-magnetitu mají v průměru nižší konduktivitu.

5 hm% nano-magnetitu + 25 hm% grafitu, rozměry 3,3×1,7×1,9 cm			
	Průměrný odpor [Ω]	Měrný odpor [$\Omega \cdot m$]	Konduktivita [$S \cdot m^{-1}$]
20 °C	3,77	0,04	27,08
100 °C	6,50	0,06	15,73
200 °C	4,40	0,04	23,25
300 °C	13,99	0,14	7,30
400 °C	26,88	0,26	3,80
10 hm% nano-magnetitu + 20 hm% grafitu, rozměry 3,5×1,7×2 cm			
	Průměrný odpor [Ω]	Měrný odpor [$\Omega \cdot m$]	Konduktivita [$S \cdot m^{-1}$]
20 °C	7,33	0,07	14,05
100 °C	2,84	0,03	36,30
200 °C	3375,18	32,79	0,03
300 °C	7,17	0,07	14,35
400 °C	15,24	0,15	6,74
20 hm% nano-magnetitu + 10 hm% grafitu, rozměry 3,4×1,7×1,7 cm			
	Průměrný odpor [Ω]	Měrný odpor [$\Omega \cdot m$]	Konduktivita [$S \cdot m^{-1}$]
20 °C	-	-	-
100 °C	18995,99	161,47	$6,19 \cdot 10^{-3}$
200 °C	312,90	2,66	0,38
300 °C	32,59	0,28	3,61
400 °C	666,07	5,66	0,18

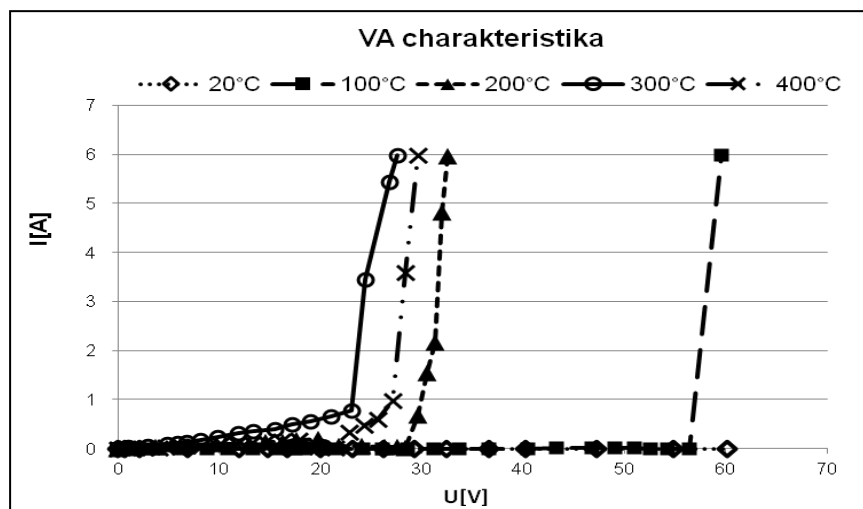
Tabulka 4 Porovnání průměrných a měrných odporů a el. vodivosti vzorků s poměrem metakaolinu a aktivátoru 1:7 a 30 hm% vodivé komponenty



Graf 18 Voltampérová charakteristika: metakaolin:aktivátor = 1:7,
5 hm% nano-magnetitu, 25 hm% C



Graf 19 Voltampérová charakteristika: metakaolin:aktivátor = 1:7,
10 hm% nano-magnetitu, 20 hm% C



Graf 20 Voltampérová charakteristika: metakaolin:aktivátor = 1:7,
20 hm% nano-magnetitu, 10 hm% C

2.6 Ekonomické aspekty výroby geopolymérů s obsahem vodivých komponent

Cena použitého grafitu se pohybovala okolo 10 Kč/kg. Měděný a bronzový prášek stál přibližně 800–900 Kč/kg. Používaný práškový nano-magnetit byl z vodivých aditiv nejdražší, a to 3000 Kč/kg, avšak dosáhl v průměru nejlepších vodivostních i mechanických vlastností. Cena metakaolinu Mefisto činí 50 Kč/kg a aktivátor ve formě běžného vodního skla stojí přibližně 60 Kč/kg.

Při přípravě 1 kg vzorku s 5 hm% nano-magnetitu a 25 hm% grafitu a poměrem metakaolinu a aktivátoru 1:7 bychom se tedy dostali na celkovou sumu necelých 200 Kč/kg. Tato částka není nijak limitující pro použití vodivých geopolymérů např. jako zamýšlená výplň v puklinách hornin. Pro výrobu 1 kg materiálu je cena grafitu a komponent matrice téměř zanedbatelná, a proto se celková částka odvíjí převážně od ceny použitého kovu.

Vzorek obsahující 10 hm% bronz a 20 hm% grafitu, jehož poměr použitého metakaolinu a aktivátoru činil 1:4, dosáhl nejlepších výsledků ze série vzorků kombinujících obsah mědi či bronz a grafitu. V tomto případě by celková suma činila přibližně 130 Kč/kg.

Pro použití malého množství vodivého geopolyméru (v jednotkách kilogramů) není výsledná částka limitující. Při větších hmotnostech by bylo při výběru vhodného aditiva nutné brát v potaz kromě tepelné a elektrické vodivosti také mechanické vlastnosti a trvanlivost výsledného materiálu.

ZÁVĚR

Při přípravě geopolymerní matrice většiny vzorků byl použit metakaolin. Pojivo Baucis L160 sice velmi dobře reagovalo s používaným aktivátorem, ale vznikala viskózní pasta, do níž pak nebylo možné vmíchat dostatečné množství vodivého materiálu.

Pro přípravu malého množství materiálu (do 200 g) doporučuji spíše ruční míchání v třecí misce. Sklo velice špatně odolává zásaditému aktivátoru, proto je třeba používat nádoby z jiných materiálů. Rovněž použité rozkládací formy nebyly optimální pro práci s geopolymery. Vzorky v mnoha případech přilnuly na stěny formy a následně došlo k jejich poškození. Zároveň docházelo k deformacím během sušení vlivem tvarové nestability zmíněných forem. Z tohoto důvodu doporučuji používat např. silikonové formy, které jsou tvarově stálé.

Prášková měď se pro účely zvýšení vodivosti geopolymérů neosvědčila jako vhodné aditivum. Její začlenění do matrice bylo velmi komplikované. Z mikroskopické analýzy bylo patrné, že částice mědi měly tendenci se shlukovat do agregátů o průměru 40–65 μm , a to jak v práškové konzistenci, tak i ve vodě a v povrchově aktivní látce. V geopolymerní pastě pak vytvářely tenký film a při sušení docházelo k výraznému vyplavování na otevřený povrch vzorků, což je takový povrch, který nebyl při sušení za zvýšené teploty (60 °C a více) v kontaktu se stěnou formy. Je tedy zřejmé, že nedošlo k fixaci mědi uvnitř struktury, nýbrž byly její částice vynášeny k povrchu vodní párou tvořící se při sušení.

Měď ani bronz zároveň nevyhovovaly z důvodu silné oxidace, která se v některých případech projevila již po několika týdnech sušení vznikem zelené měděnky. Zoxidované částice mědi již nebyly schopné vést elektrický proud a při teplotě dosahující 400 °C ztratily svou přirozenou barvu, která se změnila v šedočernou.

Práškový hliník s použitou matricí bouřlivě reagoval za vývoje vodíku. Jeho použití jako vodivého aditiva proto nebylo možné. Velmi se však osvědčil grafit PAM. Ačkoliv samotný grafit v oblasti tepelné vodivosti dosahoval podobných hodnot jako geopolymer s obsahem práškové mědi, jeho perspektiva spočívá spíše v kombinaci s dalším vodivým práškem. Dobré výsledky tepelné vodivosti měly geopolymerní

vzorky s obsahem mědi a výše zmíněného grafitu, které měly zároveň lepší mechanické vlastnosti a méně prasklin než vzorky s pouhou příměsí grafitu.

Nevyšší tepelné vodivosti dosáhl geopolymery s 5 hm% nano-magnetitu doplněného 25 hm% grafitu PAM. Při prováděném měření tepelné vodivosti vystoupala teplota vzorku nad 140 °C. Mechanické vlastnosti byly uspokojivé a materiál byl charakteristický menším množstvím prasklin avšak přítomností větších vzduchových bublin. V případě vzorků s rostoucím množstvím nano-magnetitu byla očekávána zvyšující se tepelná vodivost. Pravděpodobně z důvodu nevhodného poměru metakaolinu a aktivátoru měla tato závislost opačnou tendenci. Doporučuji proto snížit zmíněný poměr tak, aby byla zvýšena viskozita geopolymerní pasty. Dalšími faktory omezujícími tepelnou vodivost mohly být nedostatečně zbroušené dotykové plochy a tím vznikající vzduchová vrstva, přítomnost otřesů při sušení, velké množství vzduchových bublin či nedostatečně intenzivní homogenizace. Porovnání zbylých vzorků lze nalézt v kapitole 2.4.2.

Všechny vzorky s pouhým obsahem mědi či bronzu se projeví jako elektrické izolanty. Mnohem lepší vlastnosti v oblasti elektrické vodivosti měly vzorky obsahující grafit. Ze série geopolymerních vzorků s obsahem mědi či bronzu a grafitu dosáhl nejvyšší elektrické vodivosti vzorek s 10 hm% bronzem a 20 hm% grafitu, jehož konduktivita při 400 °C byla $30,61 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$. Při této teplotě však docházelo k silné oxidaci obsaženého kovu, což se projevilo změnou barvy a zhoršením mechanických vlastností. Ve srovnání se vzorkem, který obsahoval pouze příměs 30 hm% grafitu, byly tyto mechanické vlastnosti a množství prasklin přijatelné.

Geopolymer, jehož vodivou složku tvořil nano-magnetit ve spojení s grafitem, nedosáhl v oblasti konduktivity v průměru tak dobrých výsledků jako při měření tepelné vodivosti. Elektrická vodivost opět klesala se zvyšujícím se podílem kovové složky. Naměřené hodnoty těchto vzorků se měnily s rostoucí teplotou. Nejvyšší vodivost, která činila $36,3 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ byla naměřena u vzorku s 10 hm% nano-magnetitu a 20 hm% grafitu při 100 °C.

Všechny tři geopolymery s obsahem nano-magnetitu měly po vystavení vysokým teplotám prakticky stejné mechanické vlastnosti jako před zahřátím. Na povrchu nebyly pozorovány téměř žádné praskliny. Jejich jediným nedostatkem bylo množství velkých bublin, jejichž průměr dosahoval velikosti až 1,5 cm. Tyto bubliny deformovaly finální tvar vzorků a pravděpodobně při měření působily jako izolující

složka uvnitř struktury geopolymeru. O výsledcích elektrické vodivosti pojednává kapitola 4.5.2.

Pro další výzkum doporučuji připravit vzorky s obsahem jiných kovů nebo jejich slitin (např. stříbro, mosaz, platina) v kombinaci s grafitem. Zásaditá povaha geopolymeru a vystavení vysokým teplotám (až 400 °C) je pro řadu vodivých aditiv nepříznivá s ohledem na jejich oxidaci. Proto je třeba použít takové materiály, které nepodléhají korozi. Grafit je výhodný především jako doplňující příměs pro vodivější materiál, kterým je např. nano-magnetit.

V kapitole 4.6. je proveden přibližný ekonomický rozbor nejlepších vzorků, přičemž zmíněné částky jsou pouze orientační. Z uvedených cen použitých materiálů vyplývá, že se celková částka za 1 kg geopolymeru odvíjí převážně od ceny použitého kovu. Nano-magnetit byl minimálně trojnásobně dražší než měď či bronz, avšak dosáhl nejlepších výsledků v oblasti tepelné vodivosti.

Pokud geopolymery s obsahem nano-magnetitu či jiného vhodného kovu ve spojení s grafitem obstojí při měření mechanických vlastností, jistě najdou své uplatnění jako materiály umožňující akumulaci a transport tepelné a elektrické energie.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] SLAVÍK, R., BEDNAŘÍK, V., VONDRUŠKA, M. *Geopolymery a jejich použití pro nakládání s odpady*. Odpady. 2006.
- [2] *What is geopolymer? Introduction* [online]. Geopolymer Institute, [cit. 2010-11-06]. Dostupný z WWW: <<http://www.geopolymer.org/science/introduction>>.
- [3] ČERVINKA, J. *Geopolymery – využití pro restaurování kamene a souvisejících materiálů*. 2008. s. 10-11. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Fakulta restaurování.
- [4] DAVIDOVITS, J., DAVIDOVITS, R., JAMES, C. *Second International Conference Géopolymère '99*. 1999. ISBN 2-902933-14-2.
- [5] *The Geopolymerization Process* [online]. Geopolymer Alliance, [cit. 2010-11-06]. Dostupný z WWW: <<http://www.geopolymers.com.au/science/geopolymerization>>.
- [6] KOMNITSAS, K., ZAHARAKI, D. *Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry*. Minerals Engineering. 2007, 1261–1277.
- [7] ROVNANÍK, P. *Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer*. Construction and Building Materials. 2010, 1176–1183.
- [8] *About geopolymerization* [online]. Geopolymer Institute, [cit. 2010-11-06]. Dostupný z WWW: <<http://www.geopolymer.org/science/about-geopolymerization>>.
- [9] DĚDEČKOVÁ, L. *Geopolymery: budoucnost mostního stavitelství* [online]. Silnice Železnice, 2010.
- [10] FLETCHER, A. et al. *The composition range of aluminosilicate geopolymers*. Journal of the European Ceramic Society. 2005, 1471–1477.
- [11] DA SILVA, F. J. et al. *The effects of Na₂O/SiO₂ molar ratio, curing temperature and age on compressive strength, morphology and microstructure of alkali-activated fly ash-based geopolymers*. Cement & Concrete Composites. 2011, 653–660.
- [12] ŠKVÁRA, F., KOPECKÝ, L., NĚMEČEK, J., BITTNAR, Z. *Microstructure of Geopolymer Materials Based on Fly Ash*. Ceramics – Silikáty. 2006, 208–215.
- [13] XUE-MIN, Q. et al. *Preparation of phosphoric acid-based porous geopolymers*. Applied Clay Science. 2010, 600–603.

- [14] OKADA, K. et al. *Water retention properties of porous geopolymers for use in cooling applications*. Journal of the European Ceramic Society. 2009, 1917–1923.
- [15] DUTTA, D. et al. *Effect of Silica Fume Additions on Porosity of Fly Ash Geopolymers*. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2010, 74–79.
- [16] CUIA, X., ZHENG, G., HANA, Y. et al. *A study on electrical conductivity of chemosynthetic Al_2O_3 - $2SiO_2$ geopolymer materials*. Journal of Power Sources. 2008, 652-656.
- [17] DUXTON, P. et al. *Thermal Conductivity of Metakaolin Geopolymers Used as a First Approximation for Determining Gel Interconnectivity*. Materials and Interfaces. 2006, 7781–7788.
- [18] *Geopolymer Cement for mitigation of Global Warming* [online]. Geopolymer Institute, [cit. 2012-02-16]. Dostupný z WWW: <<http://www.geopolymer.org/applications/global-warming>>.
- [19] HENDRIKS, C. A. et al. *Emission Reduction of Greenhouse Gases from the Cement Industry*. Greenhouse gas control technologies conference paper – cement. 2004.
- [20] BILČÁK, M., *Možnosti použití geopolymérů pro stabilizaci odpadů*. 2008. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií.
- [21] MACKENYIE, K. J. D, BOLTON, M. J. *Electrical and mechanical properties of aluminosilicate inorganic polymer composites with carbon nanotubes*, Journal of Materials Science. 2009, 2851–2857.
- [22] BORTNOVSKY, O. et al. *Novel application of metal – geopolymers*, Ceramic Engineering and Science Proceedings. 2010, 69–80.
- [23] VACULOVÁ, H. *Pyramidy? Podle slavného vědce jsou z umělého kamene* [online]. iDNES.cz / Brno a jižní Morava, 2008 [cit. 2010-11-10]. Dostupný z WWW: <http://brno.idnes.cz/brno-zpravy.asp?c=A080621_997037_brno_taj>.
- [24] LOUDA, P. et al. *Effect of test conditions on the bending strength of a geopolymer-reinforced composite*. Journal of Materials Science. 2010, 744–749.

- [25] *Lupek* [online]. Wikipedie, otevřená encyklopedie, [cit. 2010-11-08]. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Lupek>>.
- [26] *Protokol o zkoušce č. AE 2000 – 366* [online]. KERAMIKA Horní Bříza, a. s., 2000 [cit. 2010-11-07]. Dostupný z WWW: <http://zud.cz/dokumenty/Lupek_chemicky_rozbor.pdf>.
- [27] *Vznik lupku* [online]. ZUD, a.s., [cit. 2010-11-07]. Dostupný z WWW: <http://zud.cz/dokumenty/vznik_lupku.pdf>.
- [28] *Geopolymer Valley: Nitky směřují do České republiky* [online]. Technik, 2007 [cit. 2010-11-09]. Dostupný z WWW: <<http://technik.ihned.cz/c1-21783300-geopolymer-valley-nitky-smeruji-do-ceske-republiky>>.
- [29] HEWLETT, P. C. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. Elsevier Science & Technology Books, 2004. ISBN 0750662565.
- [30] *Struska* [online]. Pražská teplárenská [cit. 2012-02-21]. Dostupný z WWW: <<http://www.ptas.cz/vedlejsi-energeticke-produkty/struska/>>.
- [31] *Struska* [online]. ZWA Company, spol. s r.o. [cit. 2012-02-21]. Dostupný z WWW: <<http://www.strusky.cz/>>.
- [32] *Základní informace o vodním skle* [online]. Vodní sklo, [cit. 2010-11-05]. Dostupný z WWW: <<http://www.vodnisklo.cz/view.php?cisloaktuality=2009120702>>.
- [33] KHALE, D., CHAUDHARY, R. *Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: A review*. Journal of Materials Science. 2007, 729–746.
- [34] BORTNOVSKY, O., ROUBÍČEK, P. *Technologie výroby dvousložkového geopolymerního pojiva Baucis H110* [patent]. RIV/62243136:_____/06:29. Uděleno 2006.
- [35] *Geopolymery* [online]. České Lupkové Závody a. s., [cit. 2010-11-05]. Dostupný z WWW: <<http://www.cluz.cz/?page=cz,geopolymery>>.
- [36] *Vedení proudu v pevných látkách*. [online]. [cit. 2012-02-23]. Dostupné z WWW: <http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/elmag/7_3#_ftn11>
- [37] *Tepelná vodivost* [online]. Wikipedie, otevřená encyklopedie, [cit. 2012-02-25]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Tepelná_vodivost>.

- [38] ANDERSON, W. A. *Technologie Electrical conductivity measurement method and apparatus* [patent]. 3784908. Uděleno 1973.
- [39] *Elektrická vodivost* [online]. Wikipedie, otevřená encyklopedie, [cit. 2012-03-05]. Dostupný z WWW: < http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrická_vodivost >.
- [40] *Thermal conductivity measurement* [online]. Wikipedia, The Free Encyclopedia, [cit. 2012-03-01]. Dostupný z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_conductivity_measurement>.
- [41] MACHÁČKOVÁ, A., KOVAL, L., PYSZKO, R. *Tepelné ustálení soustavy při měření termofyzikálních veličin stacionární metodou*. Metal. 2005.
- [42] BITTNER, J. *Geopolymery Měření tepelných vlastností materiálů*. 2006. s. 21-31. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická.
- [43] HASSENTEUFEL, J. et al. *Elektrotechnické materiály*. 1971. ISBN 63-553-71 : 39.00.
- [44] GREENWOOD, N. N., EARNSHAW, A., *Chemistry of the Elements*. 1997. ISBN 0750633654.
- [45] EMMONS, W. D. et al. *Acrylic Polymer Concrete Compositions* [patent]. US 4400413. Uděleno 1981.
- [46] ŠRÁMKOVÁ, E., *Příprava historických geopolimerů*. 2008. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Geopolymerizační reakce [7]	11
Obrázek 2 Elektronová distribuce při geopolymeraci	12
Obrázek 3 Rotační pec v ČLUZ.....	16
Obrázek 4 Schéma měřicího přístroje pro určení tepelné vodivosti	20
Obrázek 5 Speciálně upravený spirálovitý tvar lopatek	23
Obrázek 6 Prázdná forma (vlevo) a forma se vzorkem opatřená stříbrnou páskou	24
Obrázek 7 Zapracovávání měděného prášku do matrice	25
Obrázek 8 Výkvěty solí na povrchu vzorku.....	25
Obrázek 9 Prášková měď v aktivátoru.....	25
Obrázek 10A Vyplavení mědi na povrch a vznik dvouvrstvého geopolymeru.....	26
Obrázek 10B Lom vzorku s mědí vyplavenou na povrch	26
Obrázek 11 Vyplavení mědi po celém povrchu vzorku	27
Obrázek 12A Vyplavení mědi směrem od stěn formy	28
Obrázek 12B Lom vzorku s mědí vyplavenou od stěn formy	28
Obrázek 13A Ruční míchání. Kinetika sušení je zobrazena na grafu 1.	30
Obrázek 13B Homogenizace laboratorní míchačkou. Kinetika sušení je zobrazena na grafu 1.	30
Obrázek 13C Ruční míchání. Kinetika sušení je zobrazena na grafu 3.	30
Obrázek 13D Homogenizace laboratorní míchačkou. Kinetika sušení je zobrazena na grafu 2.	30
Obrázek 13E Ruční míchání, kinetika sušení podle grafu 2. Vzorek byl zabalen v PE folii.	30
Obrázek 14 Měření tepelné vodivosti	31
Obrázek 15 Schéma měření el. vodivosti.....	39
Obrázek 16 Porovnání téhož vzorku před (vlevo) a po měření el. vodivosti (vpravo)	40
Obrázek 17 Poměr metakaolinu a aktivátoru Baucis byl 3:8. Obsah mědi činil 30 hm%. Kinetika sušení je zobrazena na grafu 1.	59
Obrázek 18 Poměr metakaolinu a aktivátoru Baucis 1:4. Obsah mědi činil 35 hm%. Homogenizováno míchačkou, kinetika sušení zobrazena na grafu 2.	60
Obrázek 19 Poměr metakaolinu a aktivátoru Baucis byl 1:6. Obsah bronzu činil 20 hm% a obsah grafitu byl 10 hm%. Kinetika sušení je zobrazena na grafu 2.....	61

Obrázek 20 Poměr metakaolinu a aktivátoru Baucis byl 1:2. Obsah mědi činil 20 hm%. Kinetika sušení je zobrazena na grafu 2.	62
Obrázek 21 Poměr metakaolinu a aktivátoru Baucis byl 1:2. Obsah mědi činil 17 hm%. Vzorek obsahoval malé množství HEMA. Kinetika sušení zobrazena na grafu 1.	63
Obrázek 22 Poměr metakaolinu a aktivátoru Baucis byl 1:2. Obsah mědi činil 25 hm%. Homogenizováno míchačkou. Kinetika sušení zobrazena na grafu 2.	64

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Kinetika sušení – poměr metakaolinu a akt. Baucis byl 1:4, obsah mědi = 35 hm%.	27
Graf 2 Kinetika sušení – poměr metakaolinu a akt. Baucis byl 1:3, obsah mědi = 35 hm%.	28
Graf 3 Kinetika sušení – poměr metakaolinu a akt. Baucis byl 1:3, obsah mědi = 35 hm%.	29
Graf 4 Indukce zahřívání Al hranolu a ocelového kuželu v závislosti na čase	32
Graf 5 Porovnání tepelné vodivosti vzorku s obsahem HEMA a bez něj. Poměr metakaolinu a aktivátoru byl 1:2 a obsah mědi činil 16 hm%.	33
Graf 6 Porovnání tepelné vodivosti vzorku s obsahem HEMA a bez něj. Poměr metakaolinu a aktivátoru byl 3:4 a obsah mědi činil 9 hm%.	34
Graf 7 Porovnání tepelné vodivosti vzorků s poměrem metakaolinu a aktivátoru 1:3, s 35 hm% mědi (zelená křivka) a 35 hm% bronzu (modrá křivka).....	34
Graf 8 Porovnání vzorků se stejným poměrem komponent lišících se způsobem přípravy. Poměr metakaolinu a aktivátoru byl 1:2 a obsah mědi činil 15 hm%.	35
Graf 9 Porovnání tepelné vodivosti vzorků s poměrem metakaolinu a aktivátoru 1:4, s 25 hm% mědi a 5 hm% grafitu (zelená křivka) a podobný vzorek s 25 hm% bronzem a 5 hm% grafitu(modrá křivka)	36
Graf 10 Porovnání vzorků s poměrem metakaolinu a aktivátoru Baucis 1:7 a 30 hm% mědi a grafitu (červená křivka), 30 hm% bronzem a grafitu (zelená křivka) a 30 hm% grafitu (fialová křivka)	37
Graf 11 Porovnání vzorků s poměrem metakaolinu a aktivátoru Baucis 1:7 a 30 hm% vodivých komponent, z nichž tvořil nano-magnetit 5 hm% (červená křivka), 10 hm% (zelená křivka) a 20 hm% (fialová křivka) a zbytek tvořil vždy grafit PAM.	38
Graf 12 Voltampérová charakteristika měděného vzorku.....	40

Graf 13 Voltampérová charakteristika vzorku s poměrem metakaolinu a aktivátoru 1:4, 25 hm% mědi a 5 hm% grafitu.....	41
Graf 14 Voltampérová charakteristika vzorku s poměrem metakaolinu a aktivátoru 1:4, 25 hm% bronzu a 5 hm% grafitu.....	42
Graf 15 Voltampérová charakteristika: metakaolin:aktivátor = 1:7, 15 hm% Cu, 15 hm% C.....	44
Graf 16 Voltampérová charakteristika: metakaolin:aktivátor = 1:7, 10 hm% bronzu a 20 hm% C.....	44
Graf 17 Voltampérová charakteristika: metakaolin:aktivátor = 1:7, 30 hm% C.....	44
Graf 18 Voltampérová charakteristika: metakaolin:aktivátor = 1:7, 5 hm% nano-magnetitu a 25 hm% ...	46
Graf 19 Voltampérová charakteristika: metakaolin:aktivátor = 1:7, 10 hm% nano-magnetitu a 20 hm% C.....	46
Graf 20 Voltampérová charakteristika: metakaolin:aktivátor = 1:7, 20 hm% nano-magnetitu a 10 hm% C.....	46
Graf 21 Červená křivka popisuje indukci zahřívání vzorku č. 14. Modrá křivka znázorňuje změnu teploty ocelového kužele.....	59
Graf 22 Červená křivka popisuje indukci zahřívání vzorku č. 25. Modrá křivka znázorňuje změnu teploty ocelového kužele.....	60
Graf 23 Červená křivka popisuje indukci zahřívání vzorku č. 32. Modrá křivka znázorňuje změnu teploty ocelového kužele.....	61
Graf 24 Červená křivka popisuje indukci zahřívání vzorku č. 20. Modrá křivka znázorňuje změnu teploty ocelového kužele.....	62
Graf 25 Červená křivka popisuje indukci zahřívání vzorku č. 12. Modrá křivka znázorňuje změnu teploty ocelového kužele.....	63
Graf 26 Červená křivka popisuje indukci zahřívání vzorku č. 22. Modrá křivka znázorňuje změnu teploty ocelového kužele.....	64
Graf 27 Voltampérová charakteristika: Poměr metakaolinu : aktivátoru Baucis byl 1:2. Obsah mědi činil 9 %.	65

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Elektrická vodivost vzorku s poměrem metakaolinu a aktivátoru 1:4, 25 hm% mědi a 5 hm% grafitu	41
Tabulka 2 Elektrická vodivost vzorku s poměrem metakaolinu a aktivátoru 1:4, 25hm% bronzu a 5 hm% grafitu	42
Tabulka 3 Porovnání průměrných a měrných odporů a el. vodivosti vzorků s poměrem metakaolinu a aktivátoru 1:4 a 30 hm% vodivé komponenty	43
Tabulka 4 Porovnání průměrných a měrných odporů a el. vodivosti vzorků s poměrem metakaolinu a aktivátoru 1:7 a 30 hm% vodivé komponenty	45

SEZNAM PŘÍLOH

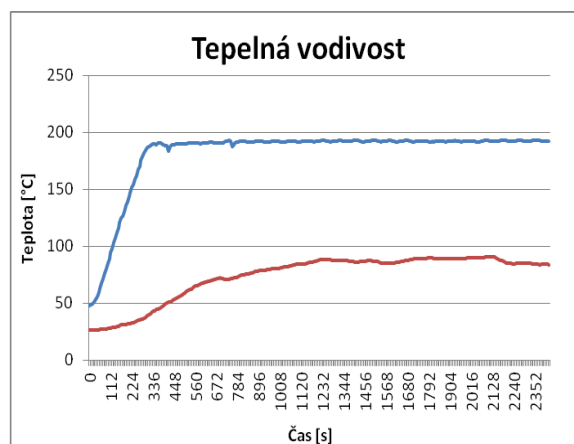
PŘÍLOHA č. 1 Ukázky výsledků měření tepelné vodivosti	59
PŘÍLOHA č. 2 Ukázka výsledků měření elektrické vodivosti	65

PŘÍLOHY

PŘÍLOHA č. 1

Ukázky výsledků měření tepelné vodivosti¹

Čas [s]	T _{Kužel} [°C]	T _{Vzorek} [°C]	Čas [s]	T _{Kužel} [°C]	T _{Vzorek} [°C]
0	47,8	26,7	1216	192,5	88
32	53,4	26,8	1248	192,6	88,5
64	67,8	26,9	1280	192,2	87,5
96	85,4	27,7	1312	192,8	87,4
128	103,5	28,8	1344	192,3	87,5
160	120,9	30,4	1376	192,2	86,6
192	135,8	31,4	1408	193	86,3
224	151,4	32,7	1440	191,7	86,8
256	167,3	34,8	1472	192,1	87,3
288	181,9	37,1	1504	192,8	87
320	188,6	41	1536	191,8	85,5
352	189,4	44,3	1568	192,6	85,3
384	189,7	47,3	1600	192,6	85,5
416	183,5	50,7	1632	191,9	86,3
448	189,3	53,1	1664	192,8	87,4
480	190,2	56,8	1696	192,2	88,3
512	190,2	60,4	1728	191,9	89
544	191	63,7	1760	192,6	89
576	190,4	66,3	1792	191,5	89,8
608	190,5	68,5	1824	192,1	89,3
640	191,4	69,7	1856	192,3	88,9
672	190,3	71,6	1888	192	89,3
704	191	71,5	1920	192,6	89,1
736	192,7	71,2	1952	192	89,2
768	190,8	72,6	1984	192	89,4
800	192,3	74,5	2016	192,5	89,9
832	191,8	75,6	2048	191,5	89,5
864	191,7	77,2	2080	192,7	90
896	192,2	78,5	2112	192,6	90,5
928	191,3	79,1	2144	192,2	90,1
960	192,1	80,1	2176	193	87,4
992	192,3	80,6	2208	192,5	85,1
1024	191,7	81,7	2240	192,3	84,7
1056	192,5	82,7	2272	193	85
1088	192,1	84	2304	191,9	85
1120	191,9	84,4	2336	192,8	84,7
1152	192,6	85,3	2368	192,9	84,1
1184	191,8	86,6	2400	192,2	84,2



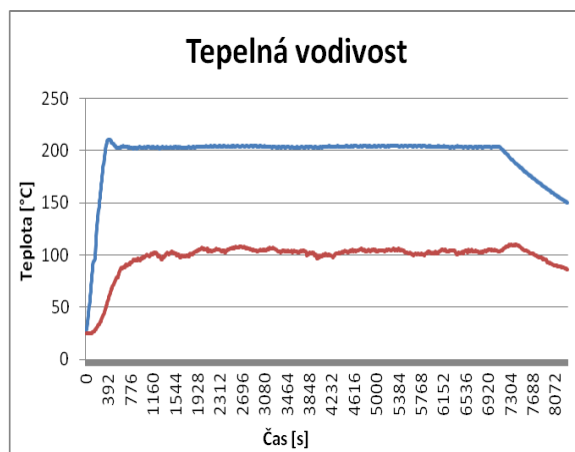
Graf 21 Červená křivka popisuje indukci zahřívání vzorku č. 14. Modrá křivka znázorňuje změnu teploty ocelového kužele.



Obrázek 17 Poměr metakaolinu a aktivátoru Baucis byl 3:8. Obsah mědi činil 30 % hmot. Kinetika sušení je zobrazena na grafu 1.

¹ Pozn. Naměřená data byla příliš rozsáhlá, proto byl zredukován počet hodnot v tabulkách. Teploty při měření tepelné vodivosti byly zaznamenávány vždy po 8 sekundách.

Čas [s]	T _{Kužel} [°C]	T _{Vzorek} [°C]	Čas [s]	T _{Kužel} [°C]	T _{Vzorek} [°C]
0	27	25	4632	205	104,2
64	51,9	25,1	4696	204	105
144	93,8	27,2	4776	205	104,1
224	143,3	33,3	4856	204	104,8
304	184,3	42,7	5016	205	103,8
384	210,2	56,4	5096	205	104
464	208,1	69,8	5176	205	105,1
544	203	78,7	5256	205	104,7
624	204	87,7	5336	205	105,8
704	204	90,8	5416	205	104,8
784	203	93,4	5496	205	102,8
864	203	95	5576	205	102,2
944	203	96	5656	205	101,1
1024	203	99	5736	205	100,5
1104	203	99,3	5816	205	100,1
1184	203	102,6	5896	205	103,7
1264	203	99,3	5976	204	101,8
1344	203	98,2	6056	205	102,8
1424	203	101	6136	204	105,3
1504	203	102,2	6216	204	103,9
1584	204	100,5	6296	204	104,4
1664	203	99,8	6376	204	100,7
1744	203	99,7	6456	204	102,9
1824	203	101,1	6536	204	104,3
1904	204	103,2	6616	204	104,4
1984	204	106,5	6696	204	104
2064	205	105,7	6776	204	102,2
2144	205	104,7	6856	204	104,3
2224	205	105	6936	204	105,4
2304	205	105,3	7016	204	104,7
2384	205	104,4	7096	204	103,3
2464	204	105,6	7176	199,9	106,3
2544	205	107,2	7256	195,7	108,5
2624	205	107,6	7336	191	109,3
2704	205	107,3	7416	186,8	109,2
2784	205	106,7	7496	182,9	106,4
2864	205	104,6	7576	178,8	104,3
2944	204	103,8	7656	175,2	101,8
3024	204	104,8	7736	171,7	99,7
3104	204	105	7816	168,3	97,6
4072	204	99,9	7896	164,8	95,6
4152	204	100,1	7976	161,7	92,5
4232	204	99	8056	158,4	90,2
4312	204	101,8	8136	155,5	89,3

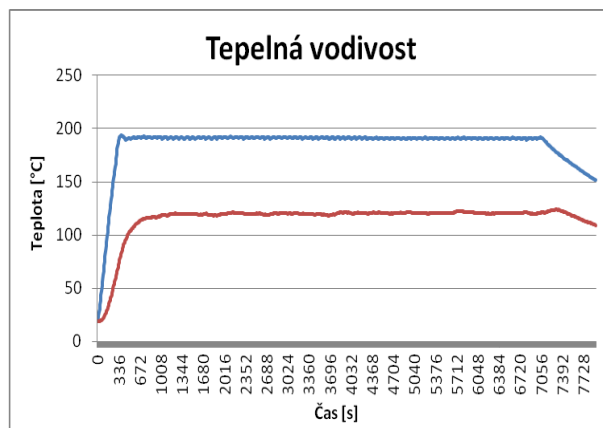


Graf 22 Červená křivka popisuje indukci zahřívání vzorku č. 25. Modrá křivka znázorňuje změnu teploty ocelového kužele.



Obrázek 18 Poměr metakaolinu a aktivátoru Baucis 1:4. Obsah mědi činil 35 % hmot. Homogenizováno míchačkou, kinetika sušení zobrazena na grafu 2.

Čas [s]	T _{Kužel} [°C]	T _{Vzorek} [°C]	Čas [s]	T _{Kužel} [°C]	T _{Vzorek} [°C]
0	21,4	19,1	4736	190,6	120,7
64	47,5	20,3	4800	191	120,9
144	93,9	28,6	4880	191,4	120,7
224	137,2	44,3	4960	191,5	121,1
304	137,2	44,3	5040	191,5	120,8
384	193,4	84,1	5120	191,4	120,4
464	190,3	97,9	5200	191,4	120,7
544	191	105,8	5280	191	120,3
624	191,5	110,9	5360	190,8	120,7
704	191,8	114,4	5440	190,7	120,9
784	191,7	115,9	5520	190,6	120,8
864	191,1	116,9	5600	189,9	120,5
944	191,1	117,1	5680	190,1	121,4
1024	190,5	118,5	5760	191	122,3
1104	191,7	118,4	5840	191,3	121,8
1184	191,8	120,1	5920	191,3	121,7
1264	192	119,9	6000	191,5	121
1344	192,1	119,6	6080	191,4	120,4
1424	192	119,8	6160	191,4	120,5
1504	191,9	119,9	6240	191,1	120
1584	191,8	119,9	6320	190,7	120,2
1664	192	119,2	6400	190,6	120,6
1744	191,5	120,1	6480	190,7	120,4
1824	191,2	118,7	6560	190	120,6
1904	191,4	118,5	6640	190,7	121
1984	191,3	119,9	6720	191,1	120,7
2064	191,2	120,3	6800	191,3	121,2
2144	191,9	121,1	6880	191,4	120,2
2224	191,9	120,9	6960	191,3	120
2304	192,1	120,2	7040	191,8	120,6
2384	192	119,9	7120	188,1	120,9
2464	192,1	119,9	7200	183,3	122,9
2544	192,2	120,2	7280	178,9	123,8
2624	192,3	120,1	7360	174,9	123,1
2704	192,2	118,7	7440	171,1	121,6
2784	192,1	120,1	7520	167,9	119,2
2864	192,1	120,1	7600	164,4	117,3
2944	191,7	120,5	7680	161,1	114,9
3024	191,4	120	7760	157,8	112,8
3104	191,4	120,1	7840	154,6	111,3
3184	191,4	120,4	7920	151,7	109,3

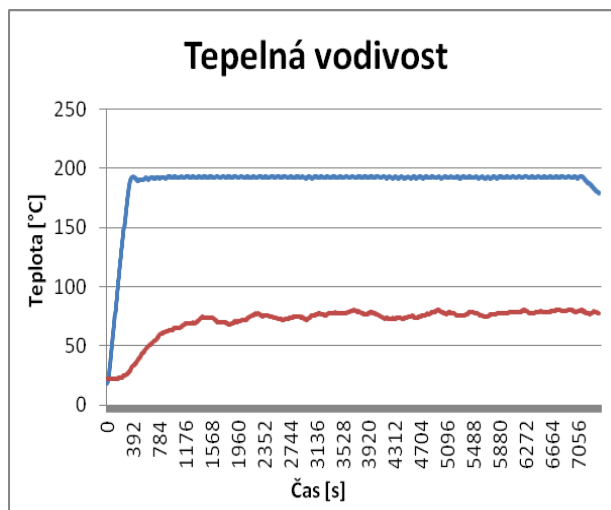


Graf 23 Červená křivka popisuje indukci zahřívání vzorku č. 32. Modrá křivka znázorňuje změnu teploty ocelového kužele.



Obrázek 19 Poměr metakaolinu a aktivátoru Baucis byl 1:6. Obsah bronzu činil 20 % hmot. a obsah grafitu byl 10 % hmot. Kinetika sušení je zobrazena na grafu 2.

Čas [s]	T _{Kužel} [°C]	T _{Vzorek} [°C]	Čas [s]	T _{Kužel} [°C]	T _{Vzorek} [°C]
0	18,1	22	3712	192,2	80,1
64	41,3	21,9	3776	193,2	79
144	86,4	22,5	3856	193,2	77,1
224	130,9	23,5	3936	193	78,2
304	170,6	26,5	4016	192,6	77,5
384	192,6	32,7	4096	192,1	75,3
464	189,8	38	4176	192,2	73,5
544	190,4	44,5	4256	192,4	73,2
624	190,9	49,7	4336	192,8	73,6
704	191,7	53,8	4416	192,9	73
784	192,3	58,7	4496	192,8	74,1
864	192,6	61,7	4576	192,5	75,5
944	193	63,2	4656	192,3	74,1
1024	193,1	65,2	4736	191,9	75,6
1104	193,1	65,8	4816	192	77,1
1184	193,1	68,9	4896	192,7	78,9
1264	192,6	69	4976	193	79,5
1344	192,3	70,2	5056	193,1	77,6
1424	192,4	74,1	5136	193	78,8
1504	192,1	73,4	5216	192,2	76,5
1584	192,6	73,9	5296	192	75,9
1664	193,2	70,3	5376	191,9	76,9
1744	193,2	69,8	5456	192,6	78,5
1824	193,4	68,6	5536	192,9	77,9
1904	193,2	70,5	5616	193	75,8
1984	192,5	70,6	5696	193	74,9
2064	192,3	71,8	5776	192,9	76,7
2144	192	74,6	5856	192,4	77,8
2224	192,5	77,2	5936	192	77,9
2304	193,2	76	6016	192,1	78,5
2384	193,1	75,7	6096	192,9	78,4
2544	192,9	73,6	6256	193,5	80,2
2624	192,4	72,4	6336	192,6	77,9
2704	192,1	72,6	6416	192,3	78,2
2784	192,4	74,3	6496	192	79,7
2864	193,1	74,8	6576	192	78,3
3184	192,4	77,7	6896	193,2	80,3
3264	192,2	75,9	6976	192,8	79,7
3344	192,1	77,3	7056	192,2	79,4
3424	192,7	78,1	7136	192,1	79,3
3504	193	77,4	7216	187,1	77,3
3648	192,6	79,4	7296	182,8	79

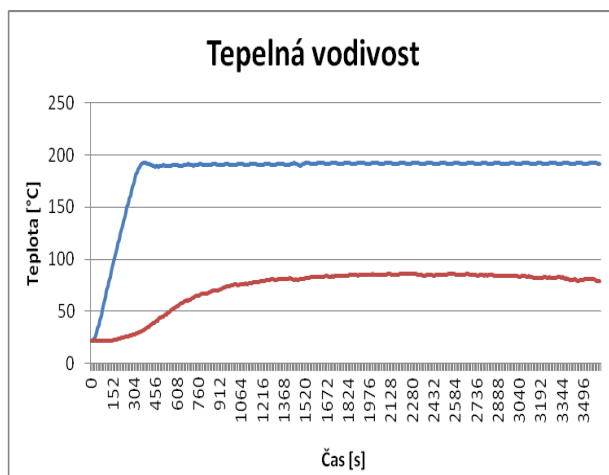


Graf 24 Červená křivka popisuje indukci zahřívání vzorku č. 20. Modrá křivka znázorňuje změnu teploty ocelového kužele.



Obrázek 20 Poměr metakaolinu a aktivátoru Baucis byl 1:2. Obsah mědi činil 20 % hmot. Kinetika sušení je zobrazena na grafu 2.

Čas [s]	T _{Kužel} [°C]	T _{Vzorek} [°C]	Čas [s]	T _{Kužel} [°C]	T _{Vzorek} [°C]
0	21,5	21,7	2256	191,3	86
64	42,4	21,6	2304	192,6	85,8
144	88,6	22,3	2384	192	84,6
224	132,7	25,2	2392	192,2	84,8
304	173,9	28,1	2464	191,3	84,8
384	192,4	33,1	2496	192,5	85,5
464	189	40,8	2544	191,1	85,8
544	189,2	48,6	2576	192,2	85,9
624	189,7	56,4	2624	191,9	85,1
704	190,7	61,5	2656	191,4	85,6
784	191,1	66,7	2704	192,5	85
864	191,1	70,1	2736	191,1	84,7
944	190,8	72,8	2784	192,3	85,2
1024	190,5	76,2	2816	191,7	84,5
1104	190,4	76,3	2864	192	84
1184	190,8	78,2	2896	192,5	84,3
1264	191,3	80,3	2944	191,1	83,6
1344	191,7	80,6	2976	192,2	84,5
1424	191,5	81,3	3024	191,3	84,2
1504	191,4	81,5	3056	191,8	83,6
1584	191,4	82,8	3104	192,2	83,5
1664	191,3	83,6	3104	192,2	83,5
1744	192,2	83,8	3104	192,2	83,5
1824	192,6	84,5	3216	191,2	82,6
1904	192,4	84,7	3264	192,4	82,2
1984	191,7	85,5	3296	192,1	82,4
2064	191,4	85,2	3344	191,9	82,5
2072	191,4	85,2	3376	192,5	81,8
2080	191,8	85,4	3424	191,3	80,4
2120	192,6	86,2	3456	192,4	79,3
2128	192,3	86,3	3504	191,1	80,7
2136	192	84,7	3536	192	80,8
2144	191,5	84,8	3584	192,4	80,1
2176	191,4	85,4	3616	191,4	79,5

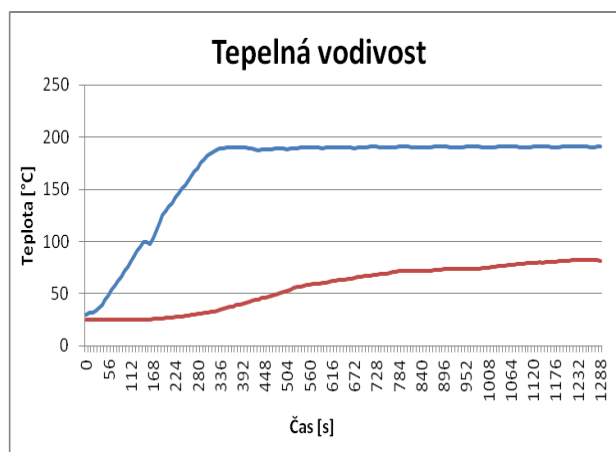


Graf 25 Červená křivka popisuje indukci zahřívání vzorku č. 12. Modrá křivka znázorňuje změnu teploty ocelového kužele.



Obrázek 21 Poměr metakaolinu a aktivátoru Baucis byl 1:2. Obsah mědi činil 17 % hmot. Vzorek obsahoval malé množství HEMA. Kinetika sušení zobrazena na grafu 1.

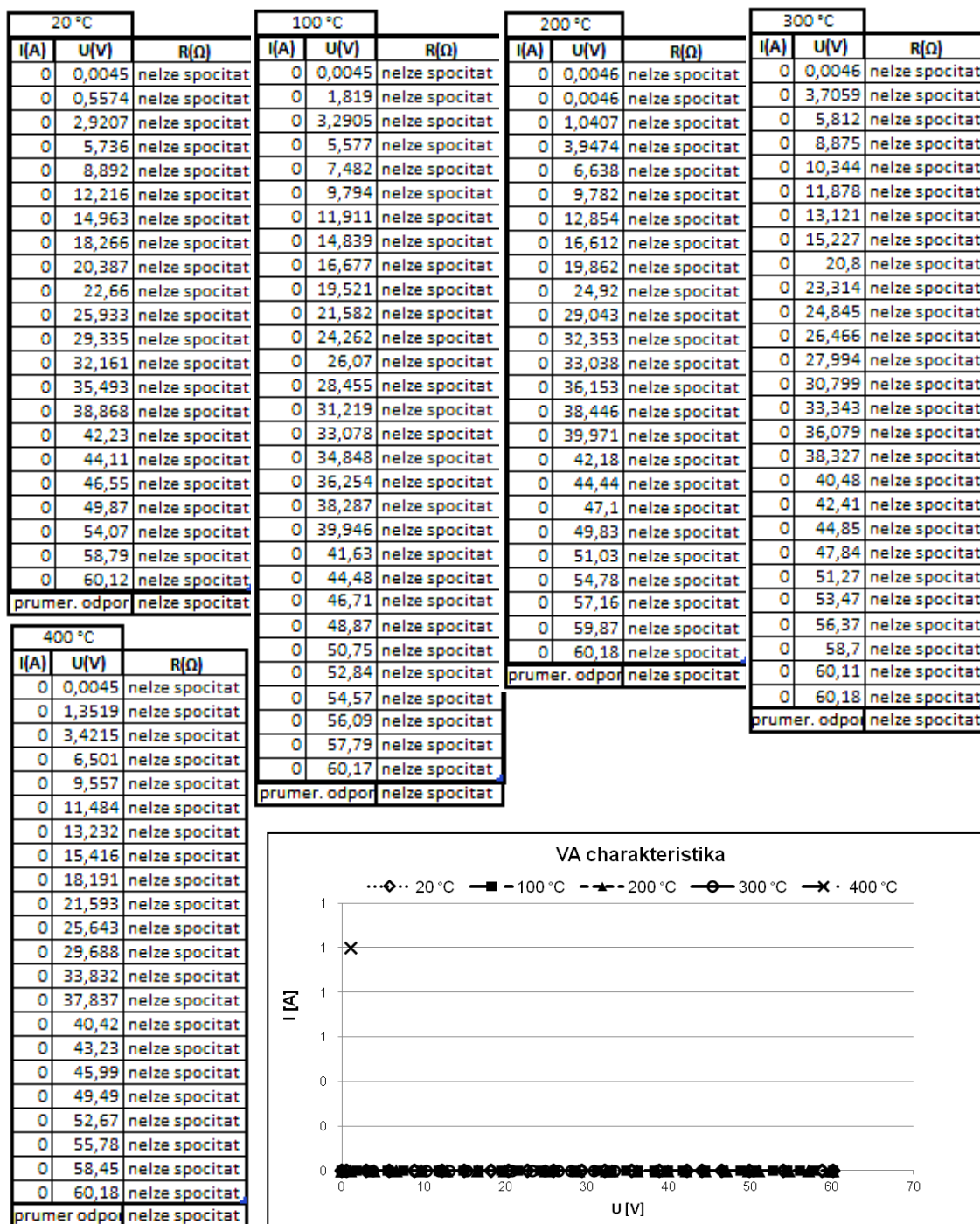
Čas [s]	T _{Kužel} [°C]	T _{Vzorek} [°C]	Čas [s]	T _{Kužel} [°C]	T _{Vzorek} [°C]
0	29,9	24,9	936	190,2	73,5
64	53,7	24,8	944	190,3	73,5
72	57,1	24,8	952	190,6	73,7
80	62,5	24,9	960	190,8	73,8
88	66,3	24,9	968	190,9	73,9
96	72	24,9	976	190,9	74
104	75,9	25	984	190,7	74,1
112	81,5	25	992	190,5	74,4
120	85,4	25	1000	190,1	74,8
200	128,8	26,6	1008	190,1	75,1
208	133,8	26,9	1016	190,5	75,6
224	142,2	27,7	1032	190,8	76,5
232	145,9	28	1040	191	76,6
240	151	28,3	1048	191,2	76,9
248	154,1	28,8	1056	191,2	77,3
256	158,7	29,1	1064	191,1	77,7
264	162	29,6	1072	190,9	77,9
272	167	30,1	1080	190,6	78,2
424	188,3	44	1088	190,2	78,4
432	187,6	44,6	1096	190,2	78,8
440	188	45,7	1104	190,5	79,1
448	188,3	46,3	1112	190,5	79,5
456	188,2	47,3	1120	190,8	79,7
464	188,6	48	1128	191,1	79,9
472	188,9	48,9	1136	191,1	80
488	189,1	50,9	1152	191	80
576	189,6	59,4	1168	190,4	80,2
584	189,7	59,7	1176	190	80,5
592	189,4	60,1	1184	190,3	80,9
600	189,6	60,8	1192	190,6	81,3
608	189,7	61,3	1200	190,7	81,5
616	189,9	62	1208	191	81,8
624	190,2	62,6	1216	191,2	81,9
632	190,3	63,1	1224	191,3	82,3
640	190,4	63,5	1232	191,4	82,1
648	190,3	63,7	1240	191,1	82,1
688	190,1	66,4	1248	190,9	82,1
696	190,3	66,8	1256	190,6	82
704	190,5	67,1	1264	190,2	82,1
712	190,6	67,5	1272	190,4	82,1
848	190,5	71,9	1280	190,7	82,1
856	190,5	72,1	1288	190,9	81,3



Graf 26 Červená křivka popisuje indukci zahřívání vzorku č. 22. Modrá křivka znázorňuje změnu teploty ocelového kužele.



Obrázek 22 Poměr metakaolinu a aktivátoru Baucis byl 1:2. Obsah mědi činil 25 % hmot. Homogenizováno míchačkou. Kinetika sušení zobrazena na grafu 2.

Ukázka výsledků měření elektrické vodivosti²

Graf 27 Voltampérová charakteristika: Poměr metakaolinu : aktivátoru Baucis byl 1:2. Obsah mědi činil 9 %.

² Zbýlé výsledky a podrobná data z měření tepelné a elektrické vodivosti jsou k nalezení na příloženém CD.